This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

+ *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.

+ *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.

+ *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.

+ *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter `http://books.google.com` durchsuchen.

Digitized by Google

University of Wisconsin
Library

CLASS TN
BOOK .SA4
2

Digitized by Google

Digitized by Google

SAMMLUNG

Elektrotechnischer Vorträge.

Unter Mitwirkung von

Prof. E. Arnold-Karlsruhe, Direktor Dr. Corsepius-Dresden, Direktor Einbeck-Berlin, Ingenieur C. P. Feldmann-Köln-Ehrenfeld, Prof. Dr. K. Feussner, Mitglied der physikal.-technischen Reichsanstalt, Oberingenieur Görling-Nürnberg, Ingenieur A. Heyland-Charleroi, Prof. Dr. Heinke-München, Ingenieur G. Hummel-München, Geheimrat Prof. Dr. E. Kittler-Darmstadt, Oberingenieur L. Kohlfürst-Kaplitz, Direktor Nerz-Nürnberg, Chefelektriker Dr. Niethammer-Berlin, Prof. Dr. G. Roessler-Berlin, Elektroingenieur Alex Rothert-Nancy, Dr. P. Schoop-London, Ingenieur Ch. P. Steinmetz-Schenectady, Oberingenieur F. Uppenborn-München, Prof. H. F. Weber-Zürich, Prof. Dr. W. Wedding-Berlin

herausgegeben von **Prof. Dr. ERNST VOIT.**

II. BAND.

MIT 326 ABBILDUNGEN.

STUTTGART.
VERLAG VON FERDINAND ENKE.
1901.

Digitized by Google

Druck der Union Deutsche Verlagsgesellschaft in Stuttgart.

Digitized by Google

59806
SEP 24 1901
TN
-SA4
2

6968671

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Der rotierende Umformer. Von Charles Proteus Steinmetz in Schenectady, N.Y. Mit 11 Abbildungen	1
Eine Methode zu experimentellen Untersuchungen an Induktionsmotoren. Von Ingenieur Alexander Heyland in Charleroi. Mit 26 Abbildungen	39
Die Wechsel- und Drehstromgeneratoren. Von Oberingenieur Dr. F. Niethammer. Mit 29 Abbildungen	77
Die drahtlose Telegraphie. Von Ingenieur Adolf Prasch, k. k. Regierungsrat und Eisenbahnoberinspektor a. D. in Wien. Mit 61 Abbildungen	113
Elektrische Bleicherei. Von Dr. P. Schoop, London. Mit 21 Abbildungen	201
Ueber mehrphasige Stromsysteme bei ungleichmässiger Belastung. Von Wlad. Karapetoff. Mit 65 Abbildungen	235
Das elektrische Blocksignal System Křižik. Von Adolf Prasch in Wien. Mit 56 Abbildungen	331
Magnetismus. Von Chefelektriker Dr. F. Niethammer. Mit 57 Abbildungen	415

Digitized by Google

Digitized by Google

Der rotierende Umformer.

Von

Charles Proteus Steinmetz

in Schenectady, N.Y.

Mit 11 Abbildungen.

I. Einleitung.

Für Kraftübertragung mittels Fernleitungen, und in vielen Fällen auch für Kraftverteilung für Beleuchtung und Motorenbetrieb, finden Wechselströme ausgedehnte Anwendung, entweder als Mehrphasenströme oder als Einphasenstrom. Für manche Zwecke indessen, wie für elektrischen Bahnbetrieb, wird Gleichstrom vorgezogen; für andere Anwendungsweisen, wie Elektrolyse, ist Gleichstrom durchaus notwendig, und für Stromverteilung unter niedriger Spannung, mittels Dreileitersystem u. s. w., wird Gleichstrom ebenfalls häufiger angewendet wie Wechselstrom. Wenn somit in solchen Fällen die Energie einer Wechselstromfernleitung entnommen werden soll, sind Umformungsapparate notwendig, um den Wechselstrom in Gleichstrom umzuwandeln.

Eine solche Umwandelung kann erfolgen durch einen Gleichstromgenerator, der von einem Wechselstrommotor, entweder Induktions- oder besser Synchronmotor, angetrieben wird, oder mittels eines sogenannten „rotierenden Umformers", d. h. einer Maschine, in der dieselbe Armatur Wechselstrom verbraucht und Gleichstrom erzeugt. Eine solche Maschine vereinigt somit bis zu einem gewissen Grade die Eigenschaft eines Synchronmotors und eines Gleichstromgenerators.

Da in einem rotierenden Umformer der Gleichstrom und der Wechselstrom denselben Armaturleiter durchfliessen, so müssen ihre

Digitized by Google

elektromotorischen Kräfte in bestimmtem Verhältnis zu einander stehen. Dies Verhältnis ist derartig, dass in den meisten Fällen spannungserniedrigende Transformatoren notwendig sind; d. h. die Wechselstromspannung ist niedriger, wie die Gleichstromspannung, und da der Hauptzweck der Stromerzeugung als Wechselstrom die Möglichkeit der Benutzung hoher Spannung in der Leitung ist, muss dieselbe für die Speisung des Umformers erniedrigt werden.

Um daher einen Vergleich anzustellen zwischen rotierendem Umformer und vom Wechselstrom angetriebenem Gleichstromgenerator, müssen wir im ersteren Falle spannungserniedrigende Transformatoren einschliessen. Der Wechselstrommotor kann sowohl ein Induktionsmotor wie ein Synchronmotor sein. Beide laufen bei Verwendung von Mehrphasenströmen von selber an, mit genügender Zugkraft, um sich selber und den Gleichstromgenerator in Bewegung zu setzen. Da aber der Synchronmotor kleiner und somit billiger ist, wie der Induktionsmotor, und auch ein höheres Güteverhältnis besitzt, und überhaupt für derartige Anwendungsweisen besser geeignet ist wie der Induktionsmotor, können wir bei dem Vergleiche mit dem rotierenden Umformer den Wechselstrommotor als Synchronmotor annehmen. Bei Fernleitungsspannung von nicht mehr wie 10000 Volts kann der Synchronmotor gewöhnlich direkt für die Linienspannung gebaut werden und spannungserniedrigende Transformatoren somit vermieden werden. Bei Spannung über 10000 Volts sind auch beim Synchronmotor spannungserniedrigende Transformatoren gewöhnlich vorzuziehen. Wir haben daher den Vergleich zwischen einer einfachen Maschine mit spannungserniedrigenden Transformatoren und einer doppelten Maschine mit oder gewöhnlich ohne Transformatoren anzustellen.

Betreffs Betriebssicherheit und Anschaffungskosten ist die einfache Maschine der doppelten Maschine offenbar überlegen.

Grössere spannungserniedrigende Transformatoren haben ein Güteverhältnis von 97 bis 98 %, oder im Mittelwert ungefähr 97,5 %. Das Güteverhältnis eines rotierenden Umformers wechselt mit der Grösse, zwischen 91 % und 95 %, mit ungefähr 93 % als Mittelwert. Ein Synchronmotor oder ein Gleichstromgenerator gibt ein Güteverhältnis von 90 bis 94 %, oder 92 % als Mittelwert. Der rotierende Umformer mit spannungserniedrigenden Transformatoren ergibt somit ein mittleres Güteverhältnis von $0{,}975 \cdot 0{,}93 = 0{,}907$ oder 90,7 %. Synchronmotor und Generator ohne Transformatoren haben ein Güteverhältnis von $0{,}92 \cdot 0{,}92 = 0{,}846$ oder 84,6 %, und mit spannungserniedrigenden Transformatoren $0{,}846 \cdot 0{,}975 = 0{,}825$ oder 82,5 %. Das Güteverhältnis

Digitized by Google

der Anlage ist somit bedeutend höher bei Benutzung des rotierenden Umformers, wie bei Benutzung von Wechselstrommotor und Gleichstromgenerator.

Der rotierende Umformer hat den Vorteil, dass keinerlei mechanische Beanspruchung existiert, da der Wechselstrom und der Gleichstrom denselben Leiter durchfliessen. Oder in anderen Worten, die der Gleichstromerzeugung entsprechende mechanische Zugkraft und das vom Wechselstrom gelieferte Drehmoment wirken auf denselben Armaturleiter ein und heben sich somit gegenseitig auf, so dass die mechanische Beanspruchung der Maschine nur die dem Leerlaufe entsprechende ist. Bei vom Wechselstrommotor getriebenem Gleichstromgenerator dagegen muss die volle Energie von Armatur zu Armatur durch den Schaft übertragen werden.

II. Verhältnis der E.M.Ke. und der Stromstärken.

Wie bereits erwähnt, besteht der rotierende Umformer zum gewissen Grade aus einer Vereinigung eines Gleichstromgenerators und eines Synchronmotors in ein und derselben Armatur.

Sei in Fig. 1 der Kommutator einer Gleichstrommaschine diagrammisch dargestellt, mit den Armaturspulen A, die benachbarte Kommutatorsignamente verbinden, den Bürsten B_1, B_2 und den Feldpolen F_1, F_2. Der Einfachheit halber sei die Maschine als zweipolig gedacht, da offenbar genau dieselben Beziehungen für eine mehrpolige Maschine gelten. In Wirklichkeit sind rotierende Umformer fast stets mehrpolig, da sie mit der Frequenz des zugeführten Wechselstromes synchron laufen müssen, und die Umlaufszahl bei zweipoligen Maschinen daher zu gross ausfallen würde.

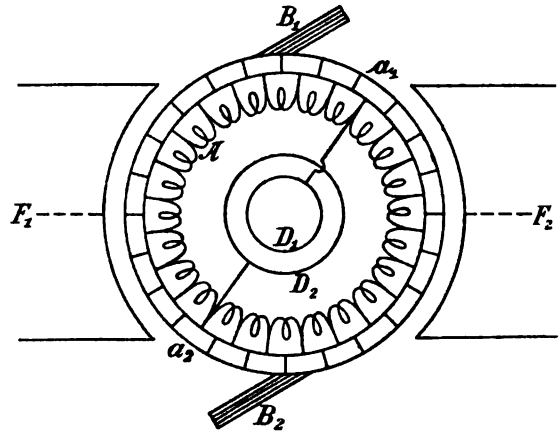
Denken wir uns nun zwei diametral gegenüberstehende Punkte a_1, a_2 des Kommutators mit zwei Gleitringen D_1, D_2 verbunden. Die E.M.K. zwischen den Punkten a_1 und a_2, und somit zwischen den Gleitringen D_1 und D_2 ist offenbar ein Maximum in dem Augenblicke, wo a_1 und a_2 mit der Stellung der Kommutatorbürsten B_1 und B_2 zusammenfällt.

Die E.M.K. ist in diesem Augenblicke gleich der Gleichstromspannung E der Maschine. Während nun die Punkte a_1 und a_2 von dieser Stellung maximaler Spannung sich fortbewegen, nimmt die Spannungsdifferenz zwischen a_1 und a_2 und somit zwischen D_1 und D_2 ab, und wird gleich Null in dem Augenblicke, wo a_1 und a_2 mit der Stellung der Feldpole F_1 und F_2 zusammenfallen. In diesem Augen-

Digitized by Google

blicke wechselt die Spannungsdifferenz zwischen a_1 und a_2 ihr Zeichen und nimmt bei weiterer Drehung der Armatur wieder zu, in entgegengesetzter Richtung, und wird wieder $= E$ der Gleichstromspannung, jedoch in entgegengesetzter Richtung wie zuvor, sobald a_1 und a_2 mit der Stellung der Bürsten B_2 und B_1 zusammenfallen.

Fig. 1.



D. h., zwischen den Gleitringen D_1 und D_2 wird eine Wechselstromspannung erzeugt, deren Maximalwert gleich der Gleichstromspannung E ist. Dieselbe macht eine vollständige Periode für jede Umdrehung der Maschine (in einer zweipoligen Maschine, oder p-Perioden pro Umdrehung in einer 2p-poligen Maschine).

Die zwischen den Gleitringen D_1 und D_2 induzierte Wechselstromspannung ist somit:

$$e = E \sin 2\pi N t,$$

wo N = Rotationsfrequenz, t = Zeit und E = Gleichstromspannung ist.

Der Effektivwert der Wechselstromspannung ist somit:

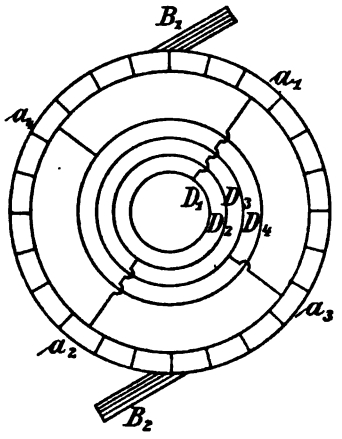
$$E_1 = \frac{E}{\sqrt{2}};$$

d. h., verbindet man zwei gegenüberliegende Stellen des Kommutators einer Gleichstrommaschine mit zwei Gleitringen, so wird zwischen diesen Gleitringen eine Wechselstromspannung erzeugt, deren Effektivwert gleich $\frac{1}{\sqrt{2}}$-mal der Gleichstromspannung, und deren Periodizität gleich der Rotationsfrequenz der Maschine ist, und da jede Wechsel-

Digitized by Google

strommaschine umkehrbar ist, so muss somit eine solche Gleichstrommaschine mit zwei Gleitringen als Synchronmotor laufen, wenn ihr eine Wechselstromspannung zugeführt wird, deren Effektivwert gleich $\frac{1}{\sqrt{2}}$mal der Gleichstromspannung, und deren Periodizität gleich der Rotationsfrequenz der Maschine ist. Eine solche Maschine bleibt aber offenbar noch Gleichstromgenerator und kann gleichzeitig, wenn vom Wechselstrom als Synchronmotor angetrieben, Gleichstrom erzeugen, und wird in diesem Falle ein rotierender Umformer genannt, und zwar ein Einphasenumformer, wenn, wie hier angenommen, der zugeführte Wechselstrom ein Einphasenstrom ist.

Fig. 2.



Verbindet man nun den Kommutator mit einem weiteren Paare von Gleitringen D_3, D_4 (Fig. 2) an zwei einander gegenüberliegenden Stellen a_3 und a_4, die in der Mitte zwischen den Verbindungsstellen a_1 und a_2 der Gleitringe D_1 und D_2 liegen, so wird offenbar zwischen den Gleitringen D_3 und D_4 eine Wechselstromspannung von derselben Periodenzahl und derselben Intensität induziert, wie zwischen den Gleitringen D_1 und D_2. Dieselbe ist aber in Quadratur oder 90° gegen die letztere Spannung verschoben, da in dem Augenblick, wo a_3 und a_4 mit der Stellung der Bürsten B_1 und B_2 zusammenfallen und somit maximale Spannungsdifferenz ergaben, a_1 und a_2 in die Richtung der Feldpole fallen, somit am Nullpunkte ihrer Spannungsdifferenz sich befinden.

Verbindet man somit vier in gleichem Abstand voneinander befindliche Stellen des Kommutators, a_1, a_2, a_3, a_4, mit vier Gleitringen D_1, D_2, D_3, D_4, so erhält man einen vierphasigen Umformer von der Spannung

$$E_1 = \frac{E}{\sqrt{2}}$$

pro Phase.

Der dem erzeugten Gleichstrom J entsprechende zugeführte Wechselstrom ist (bei Vernachlässigung innerer Verluste und Abwesenheit von Phasenverschiebung):

$$J_1 = \frac{J}{\sqrt{2}},$$

Digitized by Google

da der Gesamteffekt des Wechselstromes, $2 E_1 J_1$, gleich dem Gleichstromeffekte sein muss.

Verbindet man drei voneinander gleich weit abstehende Punkte des Kommutators einer Gleichstrommaschine, a_1, a_2, a_3, mit drei Gleitringen D_1, D_2, D_3 (Fig. 3), so erhält man den Dreiphasen- oder Drehstromumformer.

Seien in Fig. 4 die E.M.Ke. zwischen den drei Gleitringen und dem neutralen Punkte des Dreiphasensystems (die sogenannten Y-Span-

Fig. 3.

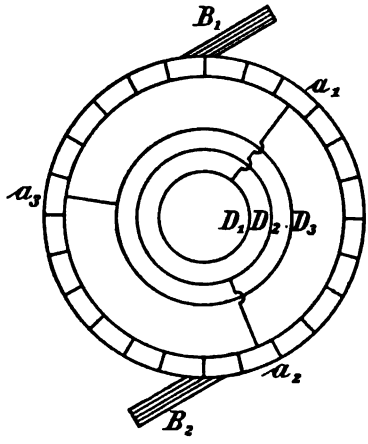
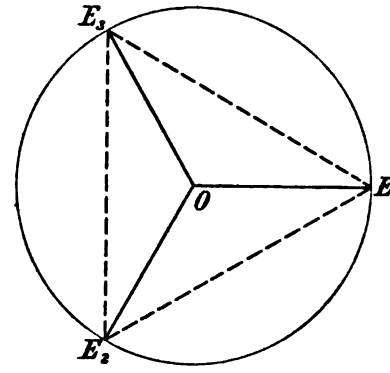


Fig. 4.



nungen) mit $\overline{OE_1}$, $\overline{OE_2}$, $\overline{OE_3}$ bezeichnet, die E.M.Ke. zwischen den Gleitringen oder $\triangle$-Spannungen somit durch $\overline{E_1 E_2}$, $\overline{E_2 E_3}$, $\overline{E_3 E_1}$ dargestellt. Die E.M.K. $\overline{OE_1}$ ist nun aber die Hälfte der E.M.K. E_1 in Fig. 1, dem Einphasenumformer, und ist somit $= \frac{E}{2\sqrt{2}}$. D. h., die Y-Spannung oder Spannung zwischen Gleitringen und neutralem Punkte eines Dreiphasenumformers ist:

$$E_1 = \frac{E}{2\sqrt{2}}$$

und die $\triangle$-Spannung oder Spannungsdifferenz zwischen zwei Gleitringen, somit:

$$E^1 = E_1 \sqrt{3}$$

$$= \frac{E\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}$$

$$= 0{,}615\, E,$$

Digitized by Google

da der gesamte Dreiphaseneffekt $3E_1J_1$ gleich dem gesamten Gleichstromeffekte EJ ist, so ist:

$$J_1 = \frac{JE}{3E_1} = \frac{2\sqrt{2}}{3} J = 0{,}943\,J.$$

Im allgemeinen ist in einem n-phasigen Umformer, d. h. einem Umformer, in dem n voneinander gleich weit abstehende Punkte des Kommutators (in einer zweipoligen Maschine oder n-Punkte pro Polpaar in einer mehrpoligen Maschine) mit n-Gleitringen verbunden sind, die Spannung zwischen Gleitringen und neutralem Punkte oder Sternspannung:

$$E_1 = \frac{E}{2\sqrt{2}}$$

und somit die Spannung zwischen benachbarten Gleitringen oder Ringspannung:

$$E^1 = 2E_1 \sin\frac{\pi}{n} = \frac{E \sin\frac{\pi}{n}}{\sqrt{2}},$$

da $\frac{2\pi}{n}$ der Winkelabstand zwischen benachbarten Gleitringen ist.

Die Stromstärke pro Linie oder Sternstrom ist somit:

$$J_1 = \frac{2\sqrt{2}J}{n}$$

und der von Linie zu Linie, oder Gleitring zu Gleitring fliessende Strom oder Ringstrom:

$$J^1 = \frac{\sqrt{2}J}{n \sin\frac{\pi}{n}}.$$

Die nachfolgende Tabelle gibt, mit der Gleichstromspannung und Gleichstromstärke als Einheit, die Wechselstromspannungen und Wechselstromstärken der verschiedenen Umformertypen.

Diese Stromstärken sind nur die dem erzeugenden Gleichstrom entsprechenden Energiekomponenten des Wechselstromes. Hiezu zu addieren sind somit die Stromstärke, die erforderlich ist, den Effektverlust im Umformer zu liefern, d. h., denselben als Synchronmotor in Bewegung zu setzen. Gleichfalls zu addieren ist die energielose oder 90° phasenverschobene Wechselstromkomponente, wo eine solche existiert.

Digitized by Google

	Gleichstrom	Einphasig	Dreiphasig	Vierphasig	Sechsphasig	Zwölfphasig	n-phasig
Spannung zwischen Gleitring und neutralem Punkte:		$\frac{1}{2\sqrt{2}} = 0{,}354$	$\frac{1}{2\sqrt{2}} = 0{,}354$	$\frac{1}{2\sqrt{2}} = 0{,}354$	$\frac{1}{2\sqrt{2}} = 0{,}354$	$\frac{1}{2\sqrt{2}} = 0{,}354$	$\frac{1}{2\sqrt{2}} = 0{,}354$
Spannung zwischen benachbarten Gleitringen:	1,0	$\frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707$	$\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} = 0{,}612$	$\frac{1}{2} = 0{,}5$	$\frac{1}{2\sqrt{2}} = 0{,}354$	0,183	$\frac{\sin\frac{\pi}{n}}{\sqrt{2}}$
Stromstärke pro Linie:	1,0	$\sqrt{2} = 1{,}414$	$\frac{2\sqrt{2}}{3} = 0{,}943$	$\frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707$	$\frac{\sqrt{2}}{3} = 0{,}472$	0,236	$\frac{2\sqrt{2}}{n}$
Stromstärke zwischen benachbarten Linien:	1,0	$\sqrt{2} = 1{,}414$	$\frac{2\sqrt{2}}{3\sqrt{3}} = 0{,}545$	$\frac{1}{2} = 0{,}5$	$\frac{\sqrt{2}}{3} = 0{,}472$	0,455	$\frac{\sqrt{2}}{n \sin\frac{\pi}{n}}$

III. Veränderung des Verhältnisses der E.M.Ke.

Die im vorigen abgeleiteten Verhältnisse der E.M.Ke. haben strenge Giltigkeit nur für die im Umformer induzierten E.M.Ke. (welche von den Klemmenspannungen mehr oder minder abweichen), und auch dies nur unter der Annahme von Sinuswellen.

Das letztere ist fast immer mit genügender Genauigkeit der Fall, aus den folgenden Gründen: infolge magnetischer Streuung ist das Magnetfeld der Maschine, selbst bei verschiedenem Verhältnisse zwischen Polbreite und Polabstand, nicht sehr bedeutend verschieden von sinuswellenförmiger Verteilung. Da aber im Umformer wie in allen Gleichstrommaschinen die Armaturwindung eine verteilte ist, d. h., die ganze Armaturoberfläche überdeckt, so ist die gesamte induzierte E.M.K. die Summe oder vielmehr Resultante einer grösseren Anzahl successive gegeneinander phasenverschobener Einzel-E.M.Ke., der E.M.Ke. der einzelnen Armaturspulen, und eine Abweichung von Sinuswellenform in der Einzel-E.M.K. gleicht sich daher in der resultierenden E.M.K. fast vollständig aus, so dass wir im allgemeinen die unter Annahme von Sinuswellen berechneten Verhältnisse als korrekt annehmen können.

Das Verhältnis der Klemmenspannung im Kommutator und an den Gleitringen des Umformers weicht indessen gewöhnlich etwas von

Digitized by Google

dem theoretischen Verhältnisse ab. Die Ursache hiefür besteht in der in der Armatur verzehrten E.M.K., und in Maschinen, die von Wechselstrom zu Gleichstrom umwandeln, in dem Unterschiede, der Wellengestalt der zugeführten und der induzierten Wechselstromspannung.

Bei Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom ist die Spannungsdifferenz an den Kommutatorbürsten bei Belastung geringer, wie die induzierte Gleichstrom-E.M.K., und die induzierte Wechselstrom-E.M.K. geringer wie die zugeführte Wechselstrom-E.M.K., infolge der vom Armaturwiderstande verzehrten Spannung.

Wenn der Wechselstrom im Umformer in Phase mit der zugeführten E.M.K. ist, so hat die Armaturselbstinduktion keinen merkbaren Einfluss auf die Spannung; ist dagegen der Wechselstrom hinter der zugeführten E.M.K. phasenverspätet, so erniedrigt die Armaturselbstinduktion die Gegen-E.M.K. oder induzierte E.M.K. unterhalb der zugeführten E.M.K. Umgekehrt, mit phasenverfrühtem Wechselstrome erhöht die Armaturselbstinduktion die induzierte E.M.K., in derselben Weise, wie in jedem Synchronmotor.

Im allgemeinen wechselt somit das Verhältnis der Klemmenspannung zwischen Kommutatorbürsten und zwischen Gleitringen etwas mit der Belastung und mit dem Phasenverhältnisse, und bei konstanter zugeführter Wechselstromspannung nimmt die Gleichstromspannung an den Kommutatorbürsten etwas ab mit zunehmender Belastung und mit zunehmender Phasenverspätung (wie sie durch abnehmende Felderregung hervorgerufen wird) und nimmt zu mit abnehmender Belastung oder zunehmender Phasenverfrühung (wie sie durch zunehmende Felderregung hervorgerufen wird).

Bei Umwandlung von Gleichstrom in Wechselstrom tritt offenbar der umgekehrte Fall ein.

Die induzierte Gleichstromspannung steht in bestimmtem Verhältnisse zu der maximalen Wechselstromspannung, und ist, wie in § 2 gezeigt, gleich zweimal der maximalen Sternspannung. Von der effektiven Spannung des Wechselstromes (d. h., der Spannung, wie sie von Spannungsmessern angegeben wird, der Quadratwurzel aus dem mittleren Spannungsquadrate), hängt die Gleichstromspannung nur insofern ab, als die effektive Wechselstromspannung von der maximalen Wechselstromspannung abhängt: Effektivspannung $= \frac{1}{\sqrt{2}}$ Maximalspannung bei Sinuswellengestalt.

Weicht daher die zugeführte Wechselstromspannung von Sinusgestalt in der Weise ab, dass sie ein verschiedenes Verhältnis zwischen

Digitized by Google

effektiver und maximaler Spannung ergibt, wie das Sinuswellenverhältnis $\frac{1}{\sqrt{2}}$, so weicht das Verhältnis zwischen Wechselstromklemmenspannung und Gleichstromklemmenspannung in derselben Weise von dem theoretischen Verhältnisse ab.

Hat z. B. die zugeführte Wechselstromspannung eine abgeflachte Wellengestalt, so ist bei demselben Effektivwerte der Wechselstrom-E.M.K. ihr Maximalwert und somit der davon abhängende Wert der Gleichstromspannung geringer wie der theoretische Wert, und umgekehrt, bei zugespitzter Wellengestalt der Wechselstrom-E.M.K. ist bei gleicher Effektivspannung die maximale Wechselstromspannung und somit die Gleichstromspannung höher. Diese Abweichung vom theoretischen Spannungsverhältnisse, infolge der Wellengestalt der zugeführten Wechselstromspannung, kann bis 10 % betragen.

Die in § 2 angegebenen Spannungsverhältnisse zwischen Gleichstrom und Wechselstrom müssen somit für den Spannungsabfall in der Armatur korrigiert werden, und mit einem Faktor multipliziert werden, der $= \sqrt{2}$ mal dem Verhältnisse zwischen effektivem und maximalem Werte der zugeführten Wechselstromspannung ist (d. h., an Stelle von $\sqrt{2}$, dem Verhältnisse zwischen maximaler und effektiver Wechselstromspannung der Sinuswelle, muss das der zugeführten Welle entsprechende Verhältnis gesetzt werden).

Weicht die zugeführte E.M.K. von Sinusgestalt ab, so durchfliesst ein Strom von höherer Periodizität, entsprechend dem Unterschiede zwischen zugeführter und induzierter E.M.K., die Umformerarmatur. Dieser Strom ist indes von fast stets zu vernachlässigender Grössenordnung.

IV. Armaturstrom und Armaturerwärmung.

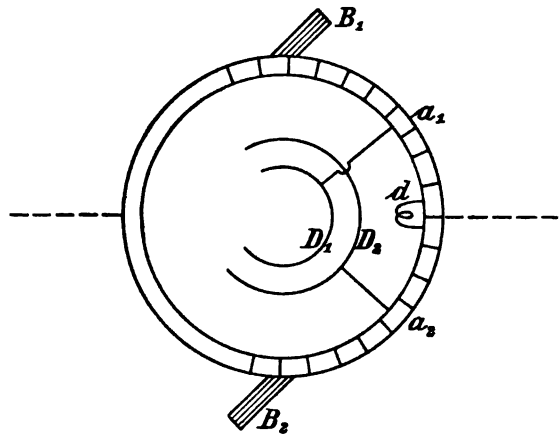
Der die Armaturleiter eines Umformers durchfliessende Strom ist die Differenz zwischen zugeführtem Wechselstrom und erzeugtem Gleichstrom.

Seien a_1 und a_2 in Fig. 5 zwei benachbarte Verbindungsstellen der Kommutatorsegmente oder Armaturspulen mit den Gleitringen D_1 und D_2 eines n-phasigen Umformers. Die Wechselstrom-E.M.K. und somit der Wechselstromenergiestrom der zwischen a_1 und a_2 liegenden Armaturabteilung erreicht ein Maximum in dem Augenblicke, wo diese Abteilung a_1, a_2 in der Mitte zwischen den Kommutatorbürsten B_1 und B_2 steht, wie in Fig. 5 gezeigt.

Digitized by Google

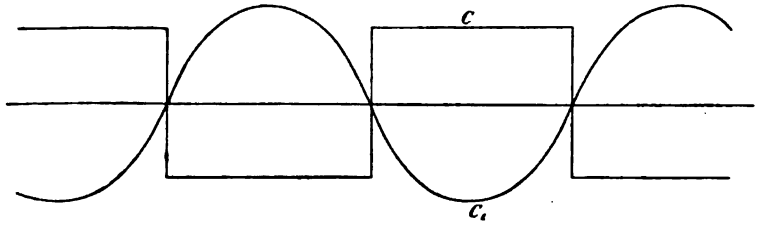
Der Gleichstrom wechselt in jeder Armaturspule seine Richtung in dem Augenblicke, wo diese Armaturspule die Kommutatorbürsten B_1

Fig. 5.



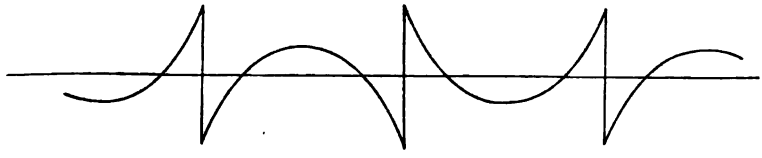
und B_2 passiert, ist somit in der Armatur ein Wechselstrom von rechteckiger Wellengestalt, wie als C in Fig. 6 gezeigt. In dem Augen-

Fig. 6.



blicke, wo der Energiewechselstrom in Abteilung a_1, a_2 ein Maximum ist, befindet sich eine in der Mitte zwischen a_1 und a_2 liegende Ar-

Fig. 7.

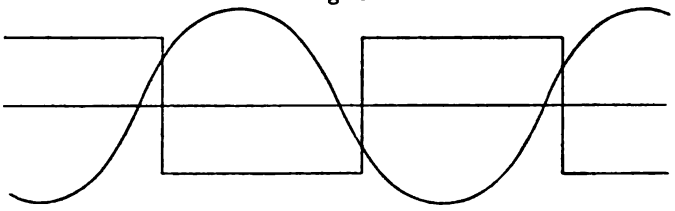


maturspule d in der Mitte zwischen den Kommutatorbürsten B_1 und B_2, wie Fig. 5 zeigt, und die diese Spule durchfliessende rechteckige Gleichstromwelle befindet sich somit in der Mitte zwischen zwei Strom-

Digitized by Google

wechseln, d. h., in der Mitte der Welle. D. h., in dieser Armaturspule ist der Energiewechselstrom und der rechteckige Gleichstrom in Phasengleichheit, aber einander entgegengesetzt, wie in Fig. 6 als C_1 und

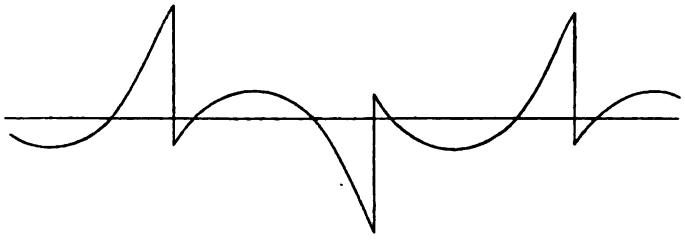
Fig. 8.



C gezeigt, und der wahre Armaturstrom, oder die Differenz zwischen C und C_1, hat somit die in Fig. 7 gezeigte Gestalt.

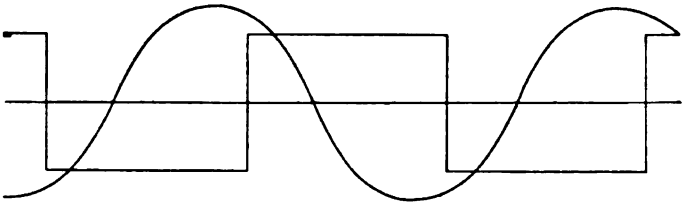
Der Stromwechsel am Kommutator in aufeinander folgenden Armaturspulen findet progressiv statt, d. h., die rechteckigen Armatur-

Fig. 9.



stromwellen, die den Gleichstrom in der Armatur darstellen, sind in den aufeinander folgenden Armaturspulen voneinander in Phase verschoben, um denselben Winkel, um den die Armaturspulen am Armaturumfange gegeneinander verstellt sind, und da der Wechselstrom

Fig. 10.

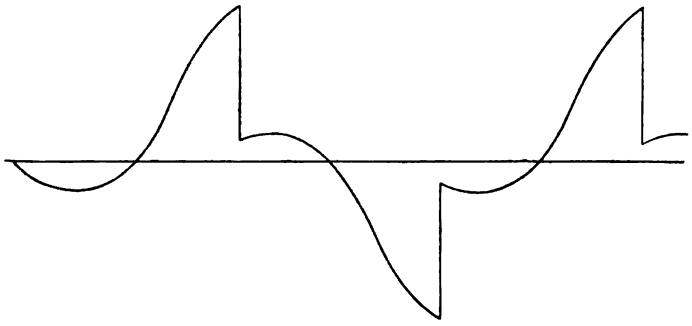


in der ganzen Armaturabteilung a_1, a_2 derselbe ist, und in Phase mit dem rechteckigen Gleichstrom in Spule d, so folgt, dass, je weiter wir am Armaturumfange von der Spule d nach a_1 oder a_2 zu gehen,

Digitized by Google

desto mehr kommt der rechteckige Gleichstrom mit dem Wechselstrom aus der Phasengleichheit heraus, wie in Fig. 8, 9, und mit noch grösserer Phasenverschiebung in Fig. 10 und 11 gezeigt. Die grösste Phasenverschiebung zwischen Energiewechselstrom und rechteckigem

Fig. 11.



Gleichstrom tritt in den Armaturspulen auf, die mit den Verbindungsstellen nach den Gleitringen zusammenfallen, und diese Phasenverschiebung ist im n-phasigen Umformer $= \frac{\pi}{n}$.

Ist somit E die Gleichstromspannung, und J der Gleichstrom, und ω der Phasenwinkel, um den eine Armaturspule des n-phasigen Umformers von der Stelle d am Armaturumfange verschoben ist, so ist der Gleichstrom während dieser Halbwelle von o bis π in dieser Armaturspule $= \frac{J}{2}$, und der Wechselstrom ist

$$\sqrt{2}\, J^1 \sin(\varphi - \omega).$$

Wo:

$$J^1 = \frac{J\sqrt{2}}{n \sin \frac{\pi}{n}}$$

der Effektivwert des Energiewechselstromes ist. Der momentane Strom in dieser Armaturspule ist somit:

$$i_0 = J^1 \sin(\varphi - \omega) - \frac{J}{2}$$

$$= \frac{J}{2}\left\{\frac{4 \sin(\varphi - \omega)}{n \sin \frac{\pi}{n}} - 1\right\}$$

Digitized by Google

und sein Effektivwert:

$$J_0 = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} i_0^2 \, d\varphi}$$

$$= \frac{J}{2}\sqrt{\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}\left\{\frac{4\sin(\varphi-\omega)}{n\sin\frac{\pi}{n}} - 1\right\}^2 d\varphi}$$

$$= \frac{J}{2}\sqrt{\frac{8}{n^2\sin^2\frac{\pi}{n}} + 1 - \frac{16\cos\omega}{n\sin\frac{\pi}{n}}},$$

da $\frac{J}{2}$ der Strom in einer Armaturspule der Maschine als Gleichstromgenerator gleicher Leistung ist.

Somit ist:

$$\gamma_\omega = \left[\frac{J_0}{\frac{J}{2}}\right]^2 = \frac{8}{n^2\sin^2\frac{\pi}{n}} + 1 - \frac{16\cos\omega}{n\pi\sin\frac{\pi}{n}}$$

das Verhältnis des Effektivverlustes im Widerstande der Armaturspule des Umformers, zu dem des Gleichstromgenerators von gleicher Leistung, und somit das Verhältnis der Armaturerwärmung beider Maschinen.

Dieses Verhältnis ist ein Maximum in den Armaturspulen, die mit den Wechselstromverbindungen nach den Gleitringen zusammenfallen, somit für $\omega = \frac{\pi}{n}$, und ist dann:

$$\gamma_m = \frac{8}{n^2\sin^2\frac{\pi}{n}} + 1 - \frac{16\cos\frac{\pi}{n}}{n\pi\sin\frac{\pi}{n}};$$

es ist ein Minimum für die in der Mitte zwischen benachbarten Wechselstromverbindungen a_1 und a_2 bestehende Spule d, d. h., für $\omega = 0$, und ist:

$$\gamma_0 = \frac{8}{n^2\sin^2\frac{\pi}{n}} + 1 - \frac{16}{n\pi\sin\frac{\pi}{n}}.$$

Ueber ω von 0 (Spule d) nach $\frac{\pi}{n}$, d. h., über die ganze Armaturabteilung von a_1 und a_2 integriert, ergibt:

Digitized by Google

$$\Gamma = \frac{n}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{n}} \gamma_\omega \, d\omega = \frac{8}{n^2 \sin^2 \frac{\pi}{n}} + 1 - \frac{16}{\pi^2},$$

als Verhältnis des gesamten Effektverlustes im Armaturwiderstande eines n-phasigen Umformers zu dem Effektverluste derselben Maschine als Gleichstromgenerator, und somit das Verhältnis der Armaturerwärmung.

Soll damit der Effektverlust im Widerstande der Armaturleiter, und somit die Armaturerwärmung dieselbe sein, so kann der Strom im Umformer, und somit seine Leistung im Verhältnisse $\frac{1}{\sqrt{\Gamma}}$ erhöht werden.

Für n Zahlenwerte eingesetzt, ergibt:

	Gleichstromgenerator	Einphasig	Dreiphasig	Vierphasig	Sechsphasig	Zwölfphasig	∞ phasig[1]
n =		2	3	4	6	12	
γ_0 =	1,00	0,45	0,225	0,20	0,19	0,187	0,187
γ_m =	1,00	3,00	1,20	0,73	0,42	0,24	
Γ =	1,00	1,37	0,555	0,37	0,26	0,20	
Leistungsfähigkeit:	1,00	0,85	1,34	1,64	1,96	2,24	2,31

In diesen Werten ist der geringe Energiewechselstrom, der die Verluste im Umformer liefert, vernachlässigt.

Nehmen wir diesen Strom = qJ_1 an, wo J_1 der dem gelieferten Gleichstrome entsprechende Energiewechselstrom ist, und q = dem prozentigen Effektverluste in mechanischer und magnetischer Reibung etc. ist, und ungefähr = 0,04 angenommen werden kann, so ist der gesamte Energiewechselstrom:

$$J_1^1 = J^1 (1 + q)$$

und der resultierende Strom:

$$i_0^1 = J^1 \sin(\varphi - \omega) - \frac{J}{2}$$

$$= \frac{J}{2} \left\{ \frac{4(1+q) \sin(\varphi - \omega)}{n \sin \frac{\pi}{n}} - 1 \right\},$$

[1]) D. h. ebenso viele Gleitringe wie Kommutatorsegmente.

Digitized by Google

somit sein Effektivwert:

$$J_0{}^1 = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_0^\pi (i_0{}^1)^2 \, d\varphi}$$

$$= \frac{J}{2}\sqrt{\frac{8\,(1+q)}{n^2 \sin^2\frac{\pi}{n}} + 1 - \frac{16\,(1+q)\cos\omega}{n\pi \sin\frac{\pi}{n}}},$$

somit

$$\gamma_\omega{}^1 = \left[\frac{J_0{}^1}{\frac{J}{2}}\right]^2 = \frac{8\,(1+q)^2}{n^2 \sin^2\frac{\pi}{n}} + 1 - \frac{16\,(1+q)\cos\omega}{n\pi \sin\frac{\pi}{n}}$$

$$= \gamma_\omega + 2q\left\{\frac{8}{n^2 \sin^2\frac{\pi}{n}} - \frac{8\cos\omega}{n\pi \sin\frac{\pi}{n}}\right\}$$

über ω von 0 nach $\frac{\pi}{n}$ integriert:

$$\Gamma^1 = \frac{n}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{n}} \gamma_\omega{}^1 \, d\omega = \Gamma + 2q\left\{\frac{8}{n^2 \sin^2\frac{\pi}{n}} - \frac{8}{\pi^2}\right\}$$

$$\Gamma^1 = \Gamma\,(1+2q) - 2q\left(1 - \frac{8}{\pi^2}\right)$$

$$= (1+2q)\left\{\frac{8}{n^2 \sin^2\frac{\pi}{n}} + 1 - \frac{16}{\pi^2}\right\} - 2q\left\{1 - \frac{8}{\pi^2}\right\}.$$

Hieraus ergeben sich die Werte der relativen Stromwärmen, Γ^1, und die entsprechenden Leistungsfähigkeiten der Maschinen, $\frac{1}{\sqrt{\Gamma^1}}$, unter Annahme von $q = 0{,}04$:

	Gleichstrom-generator	Einphasig	Dreiphasig	Vierphasig	Sechsphasig	Zwölfphasig	∞ phasig
Γ =	1,00	1,37	0,555	0,37	0,26	0,20	0,187
Γ^1 =	1,00	1,475	0,585	0,385	0,267	0,201	0,187
Leistungsfähigkeit:	1,00	0,825	1,31	1,61	1,94	2,24	2,31

Digitized by Google

Findet eine Phasenverschiebung zwischen Wechselstrom und E.M.K. im Umformer statt, so lässt sich der Strom in eine Energiekomponente, in Phase mit der E.M.K., und eine Energielosekomponente, in Quadratur mit der E.M.K., zerlegen.

Der Effektverlust oder die Stromwärme eines Wechselstromes in einem Widerstande ist gleich der Summe der Effektverluste der beiden rechtwinkeligen Komponenten des Wechselstromes, der Energiekomponente und der Energielosenkomponente. Für die erstere haben wir bereits im obigen die Werte gefunden. Tritt somit im Umformer eine Phasenverschiebung auf, so ist die Stromwärme der Energielosenkomponente zu dem im obigen abgeleiteten Effektverluste der aus Energiewechselstrom und Gleichstrom resultierenden Ströme zu addieren.

Nehmen wir z. B. den Energielosenstrom bei Vollbelastung als 30 % des Energiestromes an (wobei dieser Energielosestrom phasenverfrüht oder phasenverspätet sein kann, gewöhnlich bei Belastung das erstere ist), so beträgt der diesem energielosen Strome entsprechende Effektverlust im Armaturwiderstande $= 0{,}30^2 = 0{,}09$ der Stromwärme der Maschine als Gleichstromgenerator.

Dieser Wert 0,09 zu den Werten Γ^1 der relativen Stromwärme des Umformers addiert, ergibt alsdann Γ_0, das Verhältnis der Stromwärme in der Armatur des Umformers zu der Stromwärme derselben Maschine als Gleichstromgenerator von gleicher Leistung, bei Vollbelastung und 4 % Effektverlust und 30 % energielosem Strome:

	Gleichstromgenerator	Einphasig	Dreiphasig	Vierphasig	Sechsphasig	Zwölfphasig	∞ phasig
$\Gamma^1 =$	1,00	1,475	0,585	0,385	0,267	0,201	0,187
$\Gamma_0 =$	1,00	1,565	0,675	0,475	0,357	0,291	0,277
Leistungsfähigkeit:	1,00	0,80	1,22	1,45	1,67	1,85	1,90

V. Armaturreaktion.

Im Mehrphasenumformer ist die Armaturreaktion die Resultante der Armaturreaktion der Maschine als Gleichstromgenerator und als Synchronmotor. Da die Kommutatorbürsten des Umformers fast stets rechtwinkelig zu den Feldpolen gestellt werden, d. h., keine Bürstenverschiebung stattfindet, so besteht die Armaturreaktion des von der

Digitized by Google

Maschine gelieferten Gleichstromes in einer Polarisation der Armatur rechtwinkelig hinter den Feldpolen, d. h., der Gleichstrom sucht in der Armatur einen magnetischen Kreislauf zu erzeugen, indessen Pole 90° hinter den Feldpolen zurückstehen. Die Armaturreaktion der Energiekompenente des Wechselstromes in der Maschine als Synchronmotor besteht in einer Polarisation, die gleichfalls 90° gegen die Feldpole verschoben ist, denselben aber voraneilt, und ist somit der Gleichstrompolarisation entgegengerichtet. D. h., die Armaturreaktion des Umformers als Gleichstromgenerator und als Wechselstrommotor sind einander entgegengesetzt gerichtet.

Sei m die Gesamtzahl der Armaturwindungen eines als zweipolig angenommenen n-phasigen Umformers, und J die Gleichstromstärke. Da $\frac{m}{2}$ alsdann die Anzahl der zwischen den Kommutatorbürsten geschalteten Armaturwindungen ist, ist $\frac{mJ}{2}$ Ampèrewindung die Gesamtpolarisation der Armatur. Da aber infolge der Verteilung der Windungen über die ganze Armaturoberfläche die M.M.K. der einzelnen Windungen nicht gleichgerichtet sind, so ist die resultirende M.M.Ke. nicht die Summe, sondern die Resultante der Einzel-M.M.Ke., d. h., die Summe der M.M.K. multipliziert mit dem mittleren Kosinus der Richtungswinkel:

$$F = \frac{mJ}{2} \text{ Mitt} \left(\cos {}^{+\frac{\pi}{2}}_{-\frac{\pi}{2}} \right)$$

und da

$$\text{Mitt} \left(\cos {}^{+\frac{\pi}{2}}_{-\frac{\pi}{2}} \right) = \frac{2}{\pi}$$

ist, wird

$$F = \frac{mJ}{\pi}$$

die Gleichstrompolarisation des Umformers (oder Gleichstromgenerators).

Im n-phasigen Umformer ist die Windungszahl pro Phase $= \frac{m}{n}$. Der Strom pro Phase oder Strom zwischen benachbarten Leitern (Ringstrom) ist:

$$J^1 = \frac{\sqrt{2}\, J}{n \sin \frac{\pi}{n}},$$

Digitized by Google

somit die Ampèrewindungen pro Phase:

$$\frac{m J^1}{n} = \frac{\sqrt{2}\, m}{n^2 \sin \frac{\pi}{n}},$$

diese Ampèrewindungen sind ebenfalls nicht gleichgerichtet, sondern sind über $\frac{1}{n}$ des Armaturumfanges verteilt, und ihre resultierende M.M.K. ist somit:

$$f^1 = \frac{m J^1}{n} \text{ Mitt} \left(\cos {+\frac{\pi}{n} \atop -\frac{\pi}{n}} \right)$$

und da

$$\text{Mitt} \left(\cos {+\frac{\pi}{n} \atop -\frac{\pi}{n}} \right) = \frac{n}{\pi} \sin \frac{\pi}{n}$$

ist, so ist

$$f^1 = \frac{\sqrt{2}\, m J}{\pi n}$$

die resultierende Polarisation einer Phase des n-phasigen Umformers, ausgedrückt durch den gelieferten Gleichstrom J.

Die resultierende M.M.K. von n-gleichen M.M.Ke. von effektivem Werte f^1, somit Maximalwerte für $f^1\sqrt{2}$, die unter gleichen Winkeln $\frac{2\pi}{n}$ miteinander und gegeneinander um $\frac{1}{n}$ Periode, oder $\frac{2\pi}{n}$ in Phase verschoben, einen magnetischen Kreislauf erzeugen, ergibt sich folgendermassen:

Sei

$$f_i = f^1 \sqrt{2} \sin \left(\varphi - \frac{2 i \pi}{n} \right)$$

eine der M.M.Ke., die die Phase $\varphi = \frac{2 i \pi}{n}$ hat, und in der Richtung $\omega = \frac{2 i \pi}{n}$ wirkt. D. h., wir wählen als Nullpunkt der Zeit und des ihr entsprechenden Winkels φ den Nullwert einer der M.M.K., und als Nullwert der Richtung ω die Richtung derselben M.M.K.

Die resultierende M.M.K. in irgend einer Richtung ist alsdann:

$$f = \sum_1^n i\, f_i \cos \left(\vartheta - \frac{2 i \pi}{n} \right)$$

$$= f^1 \sqrt{2} \sum_1^n i \sin \left(\varphi - \frac{2 i \pi}{n} \right) \cos \left(\vartheta - \frac{2 i \pi}{n} \right)$$

Digitized by Google

$$= \frac{f^1\sqrt{2}}{2} \sum_1^n i \left\{ \sin(\varphi - \vartheta) + \sin\left(\varphi + \vartheta - \frac{4i\pi}{n}\right)\right\}$$

$$= \frac{f^1\sqrt{2}}{2} \left\{ n \sin(\varphi - \vartheta) + \sum_1^n i \sin\left(\varphi + \vartheta - \frac{4i\pi}{n}\right)\right\}$$

und da

$$\sum_1^n i \sin\left(\varphi + \vartheta - \frac{4i\pi}{n}\right) = 0$$

ist, ist

$$f = \frac{n\sqrt{2}}{2} f^1 \sin(\varphi - \vartheta)$$

die resultierende M.M.K. in der Richtung $\omega = \vartheta$.

Dieselbe hat somit die Phase $\varphi = \vartheta$, und die Maximalintensität: $F = \frac{n\sqrt{2}}{2} f^1$, d. h., die resultierende M.M.K. rotiert mit konstanter Intensität $F = \frac{n\sqrt{2}}{2} f^1$, und konstanter Geschwindigkeit, synchron mit dem Wechselstrome (und da im Umformer die Armatur gleichfalls synchron mit dem Wechselstrome rotiert, steht somit die resultierende M.M.K. der n-Phasen im Raume still.

Es ergibt sich somit als resultierende M.M.K. aller n-Phasen des Umformers:

$$F = \frac{n\sqrt{2} f^1}{2}$$

und da

$$f^1 = \frac{\sqrt{2}\, m J}{\pi n}$$

ist, so wird

$$F = \frac{m J}{\pi}$$

die resultierende M.M.K. des Energiewechselstromes im rotierenden Umformer oder Synchronmotorpolarisation.

Wie ersichtlich, ist dieselbe gleich der Gleichstrompolarisation, und da sie, wie oben ersehen, derselben entgegengesetzt ist, so folgt, dass die Gleichstromarmaturreaktion und die Armaturreaktion des Energiewechselstromes im Mehrphasenumformer sich gegenseitig aufheben.

Dasselbe gilt offenbar im „umgekehrten Umformer", d. h., einer Maschine, die Gleichstrom in Wechselstrom umwandelt.

Verschieden dagegen sind die Erscheinungen im Einphasenumformer.

Digitized by Google

Im Augenblicke, wo der Wechselstrom im Einphasenumformer seinen Nullwert erreicht, besteht die volle Gleichstromarmaturpolarisation $\frac{mJ}{\pi}$.

Im Augenblicke, wo der Wechselstrom ein Maximum ist, ist die Armaturreaktion die Differenz zwischen der Wechselstrompolarisation und der Gleichstrompolarisation. Da aber im Einphasenumformer der Wechselstrom den Effektivwert $J\sqrt{2}$, und somit den Maximalwert $2J$[1] hat, so ist die maximale Wechselstrompolarisation $= \frac{2mJ}{\pi}$, und somit in diesem Augenblicke die resultierende Polarisation als Differenz wieder $= \frac{mJ}{\pi}$, jedoch in ihrer Richtung entgegengesetzt zu der Armaturreaktion im Momente des Nullwertes des Wechselstromes.

D. h., im Einphasenumformer oscilliert die Armaturreaktion mit doppelter Periodizität des Wechselstromes (da eine volle Oscillation in der Zeit von Nullwert zu Nullwert des Wechselstromes durchlaufen wird) und mit einem Maximalwerte gleich dem vollen Werte der Gleichstromarmaturreaktion, zwischen einer Stellung rechtwinkelig vor den Feldpolen und einer Stellung rechtwinkelig hinter den Feldpolen.

Die Folge dieser Oscillation der Armaturreaktion ist eine Oscillation des Magnetismus am Armaturumfange, die Funkenbildung am Kommutator und Effektverlust durch Wirbelströme erzeugen kann.

Diese oscillierende Reaktion ist indes sehr wesentlich reduziert durch die dämpfende Wirkung des Magnetfeldes.

Da im Mehrphasenumformer die Hauptarmaturreaktionen sich gegenseitig aufheben, verbleiben nur:

1. Die Armaturreaktion des sehr unbedeutenden Energiewechselstromes, der die Maschine in Bewegung erhält, d. h., den inneren Effektverlust liefert. Dieselbe ist in Quadratur mit der Felderregung, oder verzerrend in Bezug auf das Feld, ist jedoch von zu vernachlässigender Grösse.

2. Die Armaturreaktion der Energielosenkomponente des Wechselstromes, wo eine solche existiert.

3. Ein Effekt oscillierender Natur, von höherer Periodizität, den man als „Obertöne der Armaturreaktion“ bezeichnen könnte.

Als rechteckiger Wechselstrom ändert der Gleichstrom in der Armatur seine Phase von Spule zu Spule. Der Wechselstrom dagegen

Digitized by Google

ist derselbe in einer ganzen Armaturabteilung zwischen benachbarten Gleitringen.

Obgleich somit die resultierende Polarisation von Gleichstrom und von Wechselstrom sich gegenseitig aufheben, verbleibt somit ein Lokaleffekt, der von der Stellung der individuellen Armaturspulen in Bezug auf die Verbindungen mit den Gleitringen abhängt, und somit in seiner Rückwirkung auf das Feld eine volle Periode macht während der Zeit, in der die Armatur sich um den Winkel zwischen benachbarten Verbindungsstellen des Kommutators mit den Gleitringen bewegt.

Diese Armaturreaktion ist somit von doppelter Periodizität im Einphasenumformer (und ist in demselben von derselben Grösse wie die Gleichstrompolarisation, und im obigen bereits als oscillierende Hauptarmaturreaktion besprochen worden).

Im Dreiphasenumformer ist diese oscillierende Reaktion von dreifacher, im Vierphasenumformer von vierfacher Periodenzahl, u. s. w.

Die Grösse dieser Oscillation im mehrphasigen Umformer ist gering, und ihr Einfluss auf das Magnetfeld meist ganz zu vernachlässigen, infolge der Dämpfung der Feldspulen, die als Kurzschlusswindung wirken, und dadurch die Pulsation des Magnetismus unterdrücken.

Ein Mehrphasenumformer in unbalanciertem Stromkreis lässt sich als Vereinigung eines balancierten Mehrphasenumformers und eines Einphasenumformers ansehen, und da selbst der Einphasenumformer befriedigenden Dienst leistet, ist somit der Einfluss eines unbalancierten Stromkreises auf den Mehrphasenumformer verhältnismässig gering.

Da die Armaturreaktion des Gleichstromes und des Wechselstromes im Mehrphasenumformer sich gegenseitig aufheben, ist keine Aenderung der Felderregung mit Aenderung der Belastung nötig.

Während im Gleichstromgenerator die bei gegebener Felderregung statthafte Armaturreaktion durch die durch dieselbe verursachte Verzerrung des Feldes begrenzt ist, existiert diese Grenze nicht im Mehrphasenumformer, in dem keine Verzerrung des Feldes unter Belastung auftritt, da die resultierende Armaturreaktion gleich Null ist. Infolgedessen kann im rotierenden Umformer eine viel grössere Armaturreaktion verwandt werden wie im Gleichstromgenerator.

Da die Armaturerwärmung im Mehrphasenumformer verhältnismässig gering ist, ist die praktische Grenze der Ueberlastungsfähigkeit eines Mehrphasenumformers die Leistungsfähigkeit des Kommutators, und ist gewöhnlich bedeutend grösser wie beim Gleichstromgenerator, infolge der Abwesenheit von Armaturreaktion und durch dieselbe ver-

Digitized by Google

anlasste Verzerrung des Magnetfeldes, die im Gleichstromgenerator bei Ueberlastung Funkenbildung am Kommutator veranlasst.

Die theoretische Grenze der Ueberlastung, d. h., die Ueberlastung, bei der der Umformer als Synchronmotor ausser Schritt gerät, und somit zum Stillstande kommt, ist bei konstanter Frequenz und Spannung des zugeführten Wechselstromes weit jenseits der Grenze, bei der die Maschine durch Ueberhitzung zerstört wird. Bei unstetiger Frequenz des zugeführten Wechselstromes aber hängt die Synchronmotorüberlastungsfähigkeit offenbar von der Grösse und der Periode der Schwankung der Frequenz des Wechselstromes ab.

VI. Energieloser Strom und Kompoundierung.

Da die vom Energiewechselstrom in der Umformerarmatur erzeugte Polarisation in Quadratur steht mit der Felderregung, und derselben 90° voraneilt, so folgt, dass die Polarisation oder M.M.K. eines 90° hinter der E.M.K. phasenverspäteten Wechselstromes in Phase ist mit der Felderregung, und die Polarisation eines 90° phasenverfrühten Stromes der Felderregung entgegengesetzt ist. Im ersteren Falle wirkt die Wechselstrompolarisation magnetisierend, im letzteren entmagnetisierend. D. h., im Umformer besteht keine Verzerrung des Feldes; und überhaupt keine Armaturreaktion, falls der Wechselstrom mit der zugeführten E.M.K. in Phase ist, eine magnetisierende Wirkung bei phasenverspätetem, eine entmagnetisierende Wirkung bei phasenverfrühtem Strome.

Ist somit der Wechselstrom phasenverspätet, so muss die Felderzeugung niedriger sein, ist der Wechselstrom phasenverfrüht, so muss die Felderregung höher sein, wie wenn der Wechselstrom mit der E.M.K. in Phase ist. Umgekehrt, wird bei Erhöhung der Felderregung ein phasenverfrühter, durch Erniedrigung der Felderregung ein phasenverspäteter Strom im Umformer erzeugt, in derselben Weise wie im Synchronmotor: d. h., wenn die Felderregung niedriger ist, wie der Wert, der die Gegen-E.M.K. gleich der zugeführten E.M.K. (Minus-Spannungsverlust) machen würde, so nimmt der Wechselstrom ein solches Phasenverhältnis an, wie nötig um den mangelnden Magnetismus zu liefern, d. h., wird phasenverspätet, und umgekehrt, wird das Feld übererregt, so wird der Wechselstrom phasenverfrüht, und entmagnetisierend um den Betrag, der nötig ist, das Feld zu dem Werte zu erniedrigen, welcher die verlangte Gegen-E.M.K. gibt.

Digitized by Google

Da im Umformer durch Aenderung der Felderregung der Wechselstrom phasenverspätet oder phasenverfrüht gemacht werden kann, damit magnetisierend oder entmagnetisierend wirkt, so kann in einem Umformer, bei konstanter zugeführter Wechselstromspannung die Felderregung innerhalb weiter Grenzen verändert werden, ohne dass die Klemmenspannung an den Kommutatorbürsten merkbar verändert wird, und in Umformern mit hoher Armaturreaktion, und verhältnismässig schwachem Felde kann der Felderzeugungsstromkreis gänzlich unterbrochen werden, und Vollbelastung und sogar Ueberlastung von der Maschine vertragen werden, ohne Felderregung, d. h., bei Erregung des Feldes mittels des in diesem Falle sich in seiner Phase verspätenden Wechselstromes.

Umformer sind daher gebaut worden, und sind im Betriebe, die gar keine Feldwindungen besitzen, sondern ihr Feld durch den phasenverspäteten Armaturstrom erzeugen, sogenannte „Reaktionsumformer", dieselben haben aber den Nachteil, dass der Wechselstrom, den dieselben verzehren, immer mehr oder minder phasenverspätet ist, und sie üben daher auf den Wechselstromkreis dieselbe Rückwirkung aus wie Induktionsmotoren, d. h., Erzeugungen eines Spannungsabfalles durch die Selbstinduktion der Fernleitung, und wirken entmagnetisierend auf den Wechselstromgenerator zurück.

Aus dem vorhergehenden folgt, dass im Umformer bei konstanter zugeführter Wechselstromspannung die Gleichstromspannung nicht durch Aenderung der Felderregung verändert werden kann, wie im Gleichstromgenerator, ausser um den geringen Betrag, um den sich das Umformungsverhältnis mit der Phasenverschiebung ändern kann (wie in § 3 auseinander gesetzt), sondern eine Aenderung der Felderregung hat den Effekt, energielose Ströme zu erzeugen, phasenverspätete bei Untererregung, phasenverfrühte bei Uebererregung.

Um die Gleichstromspannung eines Umformers zu ändern, muss somit die Wechselstromspannung, die dem Umformer zugeführt wird, geändert werden.

Dies kann entweder mittels Spannungsregulator oder Kompensator geschehen, d. h., mittels eines Transformators von variablem Uebersetzungsverhältnisse, oder mittels der Rückwirkung phasenverschobener Wechselströme auf Selbstinduktion. Die letztere Methode ist besonders für Umformer geeignet, infolge der Leichtigkeit, mit der phasenverschobene Ströme im Umformer sich durch Aenderung der Felderregung erzeugen lassen.

Die E.M.K. der Selbstinduktion eines Wechselstromkreises ist

Digitized by Google

in ihrer Phase 90° oder eine Viertelperiode hinter dem Wechselstrome verspätet.

Ist somit ein Wechselstrom 90° oder eine Viertelperiode hinter seiner Klemmenspannung verschoben, und durchläuft einen Leiter mit Selbstinduktion, so ist die E.M.K. der Selbstinduktion 90° + 90° oder 180°, d. h., eine Halbperiode hinter der Klemmenspannung verschoben, d. h., derselben entgegengesetzt gerichtet, und subtrahiert sich von derselben, d. h., bei phasenverspätetem Strome wirkt die E.M.K. der Selbstinduktion spannungserniedrigend.

Umgekehrt, läuft der Wechselstrom der Klemmenspannung 90° oder eine Viertelperiode voran, so ist die E.M.K. der Selbstinduktion 90°—90° gegen die Klemmenspannung verschoben, d. h., in Phase mit derselben und addiert sich. Oder in anderen Worten, bei phasenverfrühtem Strome wirkt die E.M.K. der Selbstinduktion spannungserhöhend.

Ist der Wechselstrom in Phase mit der Klemmenspannung, so ist die E.M.K. der Selbstinduktion 90° gegen die Klemmenspannung verschoben, und hat somit nur geringen Einfluss auf dieselbe.

Wird somit Selbstinduktion in der Leitung zwischen Umformer und Wechselstromgenerator von konstanter Spannung eingeschaltet, und durch Erniedrigung der Felderregung des Umformers ein phasenverspäteter Strom erzeugt, so wirkt die E.M.K. der Selbstinduktion dieses Stromes spannungserniedrigend, d. h., verringert die Wechselstromspannung am Umformer, und somit die Gleichstromspannung, und umgekehrt, wird durch Erhöhung der Felderregung ein phasenverfrühter Strom erzeugt, so erhöht die E.M.K. der Selbstinduktion die Wechselstromspannung am Umformer, und somit gleichfalls die Gleichstromspannung am Kommutator.

In einem Umformer, der durch Leitungen von hoher Selbstinduktion mit einer Quelle konstanter Wechselstromspannung verbunden ist, wird somit durch Erniedrigung der Felderregung die Gleichstromspannung erniedrigt, durch Erhöhung der Felderregung die Gleichstromspannung erhöht. Das Resultat einer Aenderung der Felderregung ist somit in diesem Falle dasselbe, wie im Gleichstromgenerator, die Erscheinung ihrem Wesen nach aber verschieden, und die Aenderung der Gleichstromspannung erfolgt infolge einer Aenderung der dem Umformer zugeführten Wechselstromspannung, verursacht durch die Aenderung der Rückwirkung der Leitungsselbstinduktion auf die Linienspannung infolge einer Aenderung der Phasenverschiebung des Wechselstromes. Um daher eine Aenderung der Gleichstromspannung des

Digitized by Google

Umformers durch Aenderung der Felderregung herstellen zu können, ist somit Selbstinduktion in den Wechselstromleitungen zwischen dem Umformer und dem Punkte konstanter Wechselstromspannung notwendig.

Diese Erscheinungen sind in ausgedehntem Masse zur Regulierung der Gleichstromspannung in Kraftübertragungen mittels Umformern verwandt.

Soll z. B. eine von der Belastung unabhängige konstante Gleichstromspannung vom Umformer geliefert werden, und seine Energie von einem Wechselstromgenerator konstanter Spannung über Fernleitungen von bedeutendem Widerstande gesandt werden, so wird eine bedeutende konstante Selbstinduktion (Reaktionsspulen) in die Wechselstromleitung eingeschaltet, oder dieselbe so angelegt, dass sie von Natur aus eine hohe Selbstinduktion besitzt, und die Generatorspannung, oder das Uebersetzungsverhältnis der spannungserniedrigenden Transformatoren u. s. w. so gewählt, dass bei einer bestimmten Belastung, z. B. Vollbelastung, bei Phasengleichheit der Spannungsabfall in den Leitungen die vom Umformer gelieferte Gleichstromspannung gleich der verlangten macht. Bei niedriger Belastung wird alsdann der Umformer untererregt, so dass trotz des geringeren Wechselstromes der Spannungsabfall in den Leitungen derselbe ist, wie bei Vollbelastung, d. h., der Spannungsabfall durch Selbstinduktion zu dem Spannungsabfall durch Leitungswiderstand addiert denselben Spannungsabfall ergibt, wie der Leitungswiderstand allein bei Vollbelastung. Bei Ueberlastung wird alsdann der Umformer übererregt, und der Wechselstrom somit phasenverfrüht, und Selbstinduktion in den Leitungen erhöht nun die Spannung um den Betrag, um den der Leitungswiderstand sie erniedrigt. D. h., in anderen Worten, trotz der Zunahme des Stromes von Leerlauf bis Ueberlastung bleibt der Spannungsabfall in den Leitungen (und somit die Gleichstromspannung) konstant, indem das Phasenverhältnis des Stromes sich von Phasenverspätung zu Phasenverfrühung ändert. Es ist alsdann nötig, dass bei Leerlauf der Umformer untererregt ist, und die Erregung mit zunehmender Belastung der Belastung proportional erhöht wird. Offenbar lässt sich diese Aenderung der Erregung selbstthätig erzielen durch Benutzung eines Nebenschluss- und eines Serienfeldes, d. h., durch Verbundwickelung des Umformerfeldes. Die Nebenschlusswickelung gibt alsdann die Leerlaufserregung, die Serienwickelung die zur Aenderung der Phase des Wechselstromes nötige Zunahme der Erregung mit der Belastung.

Digitized by Google

Durch passende Adjustierung von Nebenschluss- und Serienfeld lässt sich alsdann die Gleichstromspannung des Umformers bei zunehmender Belastung konstant erhalten bei konstanter Generatorspannung, oder selbst bei konstanter Felderregung des Generators, in welchem Falle die Spannungsregulierung des gesamten Kraftübertragungssystems vollständig automatisch ist, oder die Gleichstromspannung lässt sich mit zunehmender Belastung der Belastung proportional erhöhen. So sind z. B. Kraftübertragungen im Betrieb, wo die Felderregung des Generators vollständig konstant erhalten ist, d. h., keine Regulierung des Generators stattfindet, der Widerstand der Fernleitung u. s. w. gegen 10 % der Energie verzehrt, und gleichwohl der Umformer bei Leerlauf 500 Volts liefert, und seine Spannung der Belastung proportional zunimmt bis 550 Volts bei Vollbelastung. In diesem Falle durchfliessen offenbar phasenverspätete Ströme die Leitung bei leichter Belastung, und phasenverfrühte Ströme bei Ueberbelastung. Indessen ist bei grösserer Belastung die Zunahme des Wechselstromes über den der übertragenen Energie entsprechenden Betrag sehr gering, weil bei niederer Belastung der Gesamtstrom und somit Energieverlust in der Leitung gering ist.

Ein Kraftübertragungssystem mittels Umformer lässt sich somit durch Verbundfeldwickelung des Umformers und bei Benutzung von hoher Selbstinduktion in den Wechselstromlinien kompoundieren für konstante oder mit der Belastung zunehmende Gleichstromspannung, wie ein Gleichstromgenerator, jedoch beruht die Erscheinung auf wesentlich verschiedenem Prinzip, der Einwirkung phasenverschobener Wechselströme auf Selbstinduktion.

Soll indes die Gleichstromspannung unabhängig von der Belastung verändert werden, wie es z. B. bei Speisung von Niederspannungsgleichstromkreisen häufig der Fall ist, so ist automatische Regulierung mittels Verbundfeld nicht mehr möglich, sondern ein Reguliermechanismus nötig, entweder Feldrheostat im Umformer, oder Wechselstromspannungsregulator.

VII. Anlauf.

Der Mehrphasenumformer läuft von selber an. D. h., wird derselbe bei Stillstand in die Mehrphasenstromleitung eingeschaltet, so setzt er sich in Bewegung und läuft zu Synchronismus empor. Solange Synchronismus noch nicht erreicht ist, ist die E.M.K. zwischen den Kommutatorbürsten eine Wechselstrom-E.M.K., von der Periodi-

Digitized by Google

zität der Gleitung hinter Synchronismus. Ein zwischen die Kommutatorbürsten eingeschaltetes Voltmeter, oder Glühlampen, zeigen somit durch ihre Pulsation die Annäherung des Umformers an Synchrongeschwindigkeit an. Bei Anlauf wird der Feldstromkreis des Umformers geöffnet oder wenigstens sehr geschwächt.

Der Anlauf des Mehrphasenumformers ist im wesentlichen ein Hysteresiseffekt, vollständig so bei Umformern mit laminierten Magnetpolen, während in Maschinen mit Gussstahl- oder Gusseisenpolen in den Polschuhen induzierte Ströme zur Anlaufszugkraft beitragen, gleichzeitig aber durch ihre entmagnetisierende Wirkung die von der Hysteresis gelieferte Zugkraft vermindern. Die Anlaufszugkraft kommt von der Anziehung der Wechselströme der einander folgenden Phasen auf den von der vorhergehenden Phase zurückgelassenen oder remanenten Magnetismus, oder die von der vorhergehenden Phase im Polschuh induzierten Ströme, und es ist daher wesentlich, dass der Polschuh mehr wie eine Phase der Armatur überdeckt. Offenbar ist die Anlaufszugkraft nur gering, der Anlaufstrom bedeutend, und von Vollbelastungsstrom bis doppeltem Strom nötig, um ohne Belastung von Stillstand anzulaufen.

Der Einphasenumformer läuft selbstverständlich nicht von selbst an.

Während des Anlaufs verhält sich die Feldwickelung des Umformers wie eine Sekundärwickelung eines Transformators zu der Armatur als Primärwinkelung, und da die Windungszahl der Feldspule immer sehr viel grösser ist, wie die der Armatur, so ist die im Felde induzierte sekundäre Wechselstromspannung beim Anlaufe sehr bedeutend, oft von 4000—6000 Volts, und Schutzmassregeln notwendig, um Durchschlagen der Feldisolierung durch diese Hochspannung zu vermeiden.

Von einigen Sekunden bis zu einer Minute oder mehr ist zum Anlaufe notwendig. Sobald Synchronismus erreicht ist, wird der Feldstromkreis geschlossen und somit das Feld erregt, und alsdann die Belastung an die Maschine angeschlossen. Beim Anlauf muss offenbar die Gleichstromseite des Umformers offen sein, da die E.M.K. zwischen den Kommutatorbürsten beim Anlauf wechselnd ist.

Beim Anlauf von der Wechselstromseite ist die Polarität des Umformers unbestimmt. D. h., es hängt vom Zufall ab, welche der beiden Kommutatorbürsten bei Erreichung von Synchronismus die positive wird.

Die Polarität kann indes umgekehrt werden durch Erregung des Feldes in der gewünschten Weise. D. h., falls der Umformer-Synchro-

Digitized by Google

nismus so erreicht, dass die Bürste, welche positiv sein soll, negativ ist, wird der Feldstromkreis so erregt wie nötig, um die gewünschte Polarität zu geben, und die Umformerarmatur gleitet alsdann eine Polbreite zurück, und die Polarität kehrt sich um.

Da beim Anlauf des Umformers von der Wechselstromseite ein sehr bedeutender und noch dazu phasenverspäteter Wechselstrom nötig ist, so ist es im allgemeinen vorzuziehen, denselben von der Gleichstromseite anlaufen zu lassen, als Gleichstrommotor, wo dies möglich ist, d. h., wo Gleichstrom vorhanden ist. Dies ist der Fall, wo der Umformer eine Sammlerbatterie speist, oder mit Gleichstromgeneratoren in parallel geschaltet ist. Speist der Umformer ein Gleichstromnetz zusammen mit anderen Umformern oder Umformerstationen, so muss der erste Umformer von der Wechselstromseite angelassen werden, alle anderen Umformer können von der Gleichstromseite angelassen werden.

VIII. Umgekehrter Umformer.

Umformer werden verwandt, um Wechselstrom (Mehrphasenstrom) in Gleichstrom umzuwandeln, oder als „umgekehrte Umformer", um Gleichstrom in Wechselstrom umzuwandeln.

Die erstere Anwendungsweise ist bei weitem häufiger. Indes ist es gelegentlich wünschenswert, Gleichstrom in Wechselstrom zu verwandeln. In Gleichstromverteilungsnetzen z. B. kann ein fern gelegener Distrikt, der sich direkt mit dem Gleichstrom nicht erreichen lässt, mit Elektrizität versehen werden, indem der Gleichstrom mittels umgekehrtem Umformer in Wechselstrom umgewandelt wird, der Wechselstrom unter hoher Spannung, mittels spannungserhöhenden und spanungserniedrigenden Transformatoren, übertragen wird, und am Verbrauchsorte mittels Umformer wieder in Gleichstrom zurückverwandelt wird. Oder in einer Zentralstation, die Gleichstromgeneratoren für Stromverteilung über mässige Entfernungen, und Wechselstromgeneratoren für Fernleitung enthält, kann ein Umformer benützt werden, um die Belastung von Gleichstromgenerator auf Wechselstromgenerator zu übertragen, und umgekehrt, und es somit zu ermöglichen, die Maschinen stets bei ökonomischer Belastung im Betrieb zu haben. In diesem Falle transformiert der Umformer manchmal von Gleichstrom in Wechselstrom, manchmal von Wechselstrom in Gleichstrom, je nach der Verteilung der Belastung zwischen den Gleichstrom und den Wechselstromgeneratoren, dient somit als Bindeglied zwischen den Maschinen.

Digitized by Google

Bei Umwandelung von Wechselstrom in Gleichstrom ist die Umlaufsgeschwindigkeit des Umformers durch die Periodizität bedingt, und durch eine Aenderung der Felderregung nicht geändert, sondern eine Aenderung der Felderregung ändert nur das Phasenverhältnis des Wechselstromes.

Bei Umwandelung von Gleichstrom in Wechselstrom dagegen, mit dem Umformer als einziger Quelle des Wechselstromes, d. h., im Falle der Umformer nicht mit mechanisch angetriebenen Wechselstromgeneratoren parallel geschaltet ist, hängt die Umdrehungsgeschwindigkeit oder Turenzahl des Umformers von seiner Magnetfeldstärke ab, wie in jedem Gleichstrommotor, und nimmt daher mit zunehmender Felderregung ab, mit abnehmender Felderregung zu.

Als Wechselstromgenerator aber hängt die Feldstärke (der magnetische Kreislauf) bei konstanter Felderregung von der Stärke und der Phasenverschiebung des gelieferten Wechselstromes ab, und phasenverspäteter Strom vermindert, phasenverfrühter Strom vermehrt die Feldstärke durch eine magnetische Rückwirkung auf das Feld. In einem solchen umgekehrten Umformer nimmt daher die Feldstärke ab, und die Geschwindigkeit und somit Periodizität zu, falls der gelieferte Wechselstrom phasenverspätet wird, und die Feldstärke nimmt zu, und Geschwindigkeit und Periodizität ab, falls der Wechselstrom phasenverfrüht wird.

Wird somit ein umgekehrter Umformer, der als Kombination von Gleichstrommotor und Wechselstromgenerator aufgefasst werden kann, mittels phasenverspätetem Wechselstrom belastet, z. B. wenn ein Umformer davon angelassen wird, so vermindert die entmagnetisierende Wirkung des Wechselstromes die Feldstärke, und Geschwindigkeit und Periodizität des Umformers nimmt zu. Falls nun die Phasenverspätung durch die zunehmende Periodizität zunimmt, so nimmt die entmagnetisierende Wirkung und somit die Geschwindigkeit noch weiter zu, und in einem solchen Falle kann die Geschwindigkeitszunahme so bedeutend werden, dass die Geschwindigkeit sich nicht mehr durch den Feldrheostat kontrollieren lässt, sondern die Maschine davon läuft.

Umgekehrte Umformer müssen daher sorgfältig beaufsichtigt werden, besonders wenn andere Umformer von denselben angelassen werden, und irgend welche vollständig zuverlässige Sicherheitsvorrichtung ist notwendig, um den Umformer vollständig auszuschalten, sobald seine Geschwindigkeit unkontrollierbar wird.

Diese Gefahr des Davonlaufens besteht offenbar nicht, falls der

Digitized by Google

umgekehrte Umformer mit Wechselstromgeneratoren parallel geschaltet ist, und der Wechselstromgenerator und die ihn treibende Dampfmaschine u. s. w. genügend kräftig sind, einer Geschwindigkeitszunahme nicht zu folgen. Im umgekehrten Umformer, der mit Wechselstromgeneratoren von konstanter Geschwindigkeit, d. h., konstanter Periodizität, parallel geschaltet ist, wird somit die Geschwindigkeit nicht mehr durch eine Aenderung der Felderregung verändert, sondern eine Aenderung der Felderregung ändert nur die Phase des vom Umformer gelieferten Wechselstromes, und eine Erhöhung der Felderregung macht den Wechselstrom phasenverspätet, eine Verminderung der Felderregung macht den gelieferten Wechselstrom phasenverfrüht (d. h., umgekehrt wie im vom Wechselstrom gespeisten Umformer). Ein solcher umgekehrter Umformer lässt sich daher als eine Maschine auffassen, die Energie vom Gleichstromkreis empfängt und Energie in den Wechselstromkreis liefert, gleichzeitig aber energielose Ströme vom Wechselstromkreis empfängt, und zwar phasenverfrühten Strom bei Uebererregung, phasenverspäteten Strom bei Untererregung.

Ein solcher umgekehrter Umformer lässt sich somit in derselben Weise wie ein gewöhnlicher Umformer oder ein Synchronmotor als Wechselstromkompensator verwenden, d. h., als Apparat um phasenverschobene Ströme zu erzeugen, verfrüht oder verspätet, und dadurch in anderen Teilen des Wechselstromkreises erzeugte energielose Ströme zu neutralisieren.

IX. Doppelgenerator.

Dem Aussehen nach ist der Doppelgenerator ähnlich dem Umformer, der Wechselstrom in Gleichstrom verwandelt, und dem umgekehrten Umformer, der Gleichstrom in Wechselstrom verwandelt. Der Doppelgenerator ist eine Maschine, die mechanisch angetrieben ist, und sowohl Wechselstrom wie Gleichstrom liefern kann. Sie enthält daher, ebenso wie der Umformer, eine Armaturwindung, die gleichzeitig mit einem Kommutator und mit Gleitringen versehen ist.

Naturgemäss ist die Verwendung des Doppelgenerators beschränkt auf die Grössen und Geschwindigkeiten, für die sich ein guter Gleichstromgenerator und ein guter Wechselstromgenerator mit derselben Polzahl bauen lässt. Im allgemeinen sind daher Maschinen von niederer Geschwindigkeit, hoher Periodenzahl und geringer Leistung ausgeschlossen.

Der wesentliche Unterschied zwischen Doppelgenerator und Umformer ist, dass im ersteren der Gleichstrom und der Wechselstrom

Digitized by Google

nicht in entgegengesetzter Richtung die Armaturwindungen durchfliessen, wie im letzteren, sondern in derselben Richtung, und die Armaturerwärmung und Armaturreaktion somit der Summe beider Ströme entspricht.

Da bei gleicher Belastung und gleicher Felderregung die Armaturpolarisation oder M.M.K. des Armaturstromes dieselbe ist für den Gleichstrom und für den Wechselstrom, so folgt, dass die resultierende Armaturpolarisation des Doppelgenerators der Gesamtbelastung proportional ist, und unabhängig davon ist, in welcher Weise diese Belastung sich zwischen dem Gleichstrom und dem Wechselstrom verteilt.

Der Effektverlust im Armaturwiderstande hängt gleichfalls von der Summe der beiden Ströme und somit der Gesamtbelastung der Maschine ab.

Die Leistungsfähigkeit des Doppelgenerators ist somit begrenzt durch den Effektverlust im Armaturwiderstande, und durch die Feldverzerrung infolge der Armaturreaktion, in derselben Weise wie im Gleichstromgenerator oder Wechselstromgenerator, und somit bedeutend geringer wie im Umformer.

Infolge der Armaturreaktion und der dadurch verursachten Verzerrung des Magnetfeldes müssen im Doppelgenerator die Gleichstrombürsten stets mehr oder minder aus der neutralen Stelle (Mitte zwischen benachbarten Polen) verschoben werden, und die Richtung der Gleichstromarmaturpolarisation ist daher gegen die neutrale Lage (oder Richtung rechtwinkelig zu den Feldpolen) um den Winkel der Bürstenverschiebung verschol n. Die Richtung der Wechselstromarmaturpolarisation ist gegen die neutrale Stellung verschoben um den Winkel der Phasenverschiebung des Wechselstromes. Die Richtung der beiden Teile der Armaturpolarisation, der Gleichstrom- und der Wechselstrompolarisation, sind daher im Doppelgenerator gewöhnlich verschieden, und ihre Rückwirkung auf das Feld oder die Armaturreaktion daher gewöhnlich verschieden für den Gleichstrom und für den Wechselstrom.

Die Armaturreaktion des Gleichstromes auf das Feld lässt sich durch eine Serienwinkelung des Feldes aufheben. Die Armaturreaktion des Wechselstromes auf das Feld lässt sich bei Speisung von Umformern von dem Doppelgenerator durch Aenderung des Phasenwinkels mit der Belastung aufheben, und eine solche Aenderung des Phasenwinkels mit der Belastung wird durch Verbundwinkelung des Umformerfeldes erzeugt, wie im vorigen auseinander gesetzt. Offenbar

Digitized by Google

ist in diesem Falle Selbstinduktion in den Wechselstromleitungen notwendig.

Ein Doppelgenerator, der an der Wechselstromseite einen Umformer speist, lässt sich daher als ein Gleichstromgenerator auffassen, in dem ein Teil des Kommutators und der dazu gehörige Teil des Serienfeldes vom Generator getrennt ist, und davon durch die Wechselstromleitung verbunden ist.

Selbstregulierung des Doppelgenerators ist natürlich nur möglich, wo die Phasenverschiebung des Wechselstromes von der Belastung abhängt, und von Verspätung bei Leerlauf an der Wechselstromseite sich zu Phasenverfrühung bei Ueberlastung ändert, in der Weise, wie durch einen Umformer mit Verbundfeldwindung hervorgerufen.

Anderenfalls ist die Regulierung des Generatorfeldes mittels Rheostat notwendig. Dies ist z. B. der Fall, wo die Spannung des Doppelgenerators den Betriebsbedingungen des gespeisten Gleichstromnetzes entsprechend reguliert werden muss, und die vom Doppelgenerator gespeisten Umformer gelieferte Gleichstromspannung unabhängig von der Spannung des Doppelgenerators, lokalen Zuständen entsprechend reguliert werden muss.

Im Vergleich mit einem Gleichstromgenerator muss ein Doppelgenerator ein sehr stabiles Magnetfeld besitzen, um bei Belastung mit stark phasenverspätetem und somit entmagnetisierendem Wechselstrome nicht seine Erregung zu verlieren. Separate Erregung ist daher gewöhnlich vorzuziehen.

X. Schluss.

Zahlreiche Kombinationen der besprochenen Maschinenformen: Umformer, umgekehrter Umformer und Doppelgenerator, miteinander und mit Gleichstrom und Wechselstromgeneratoren und -Motoren bestehen.

So z. B. kann ein Umformer benützt werden, gleichzeitig als Synchronmotor einen gewissen Betrag mechanischer Arbeit zu leisten. In diesem Falle ist der Wechselstrom grösser wie der dem gelieferten Gleichstrome entsprechende Wert, um den Betrag, der die geleistete mechanische Arbeit liefert, und die Armaturreaktionen heben sich nicht gegenseitig auf, sondern die Wechselstrompolarisation ist grösser wie die Gleichstrompolarisation, um den Betrag, der dem Strome entspricht, welcher die mechanische Arbeit leistet. Der Effektverlust im Armaturwiderstande ist gleichfalls erhöht.

Digitized by Google

Ebenso kann ein umgekehrter Umformer benützt werden, gleichzeitig als Gleichstrommotor mechanische Arbeit zu leisten.

Im allgemeinen hat indes eine solche Anordnung den Nachteil, Selbstregulierung der Spannung nicht mehr möglich zu machen, ausser wenn die mechanische Arbeitsleistung sehr unbedeutend ist.

Ein Doppelgenerator kann mehr Effekt in den Wechselstromkreis senden, wie der ihm zugeführten mechanische Arbeit entsprechend, indem er von der Gleichstromseite Energie empfängt.

In einem solchen Falle wird ein Teil des geleisteten Wechselstromeffektes aus mechanischer Arbeit erzeugt, der andere aus Gleichstromeffekt transformiert, und die Maschine vereinigt die Eigenschaft eines Wechselstromgenerators und eines umgekehrten Umformers.

Oder eine solche Maschine kann mehr Gleichstromeffekt leisten wie sie mechanische Arbeit empfängt, indem sie aus dem Wechselstromkreis Energie entnimmt, und kann alsdann als Kombination von Gleichstromgenerator und Umformer betrachtet werden.

In beiden Fällen sind die Armaturreaktion u. s. w. Summe der Reaktion u. s. w. beider in der Maschine vereinigten Typen.

Bereits ausserhalb unserer Betrachtung liegt die Benützung des Umformers um Wechselstrom in Wechselstrom von verschiedener Phase umzusetzen, z. B. bei Benützung eines vierphasigen Umformers, der Wechselstromeffekt in einer seiner Phasen von einem Einphasensystem empfängt, und von seiner zweiten Phase einen gegen den ersteren Strome um eine Viertelperiode verschobenen Strom in das Verteilungsnetz sendet, somit mit dem Einphasensystem zusammen ein Zweiphasensystem liefert, oder bei Benützung eines Dreiphasenumformers, der mit zweien seiner Gleitringe Effekt von einem Einphasensystem empfängt, und von seinem dritten Gleitringe aus den dritten Leiter eines Dreistromsystems speist u. s. w.

XI. Einige typische Umformeranlagen.

Die erste grössere Umformerstation wurde im Jahre 1894 in Betrieb gesetzt in Portland, Oregon (Westamerika). Dieselbe bestand aus zwei Umformern von je 400 Kilowatt Leistung für Bahnbetrieb, und ist seitdem durch mehrere Umformer derselben Leistung vergrössert worden.

Die Generatoren in Oregon City sind 450 Kilowatt Dreiphasenmaschinen, von Turbinen getrieben, und von 6000 Volt Klemmenspannung, 33 Perioden. Jeder der Generatoren speist einen 8poligen Umformer über separate Fernleitung. Die Fernleitung ist 23 km

Digitized by Google

lang. Spannungserniedrigende Transformatoren speisen die Umformer in Portland. Der Verlust in Fernleitung und Transformatoren ist 12 % bei Vollbelastung. Die Generatoren arbeiten mit konstanter Felderregung, und die Spannungsregulierung erfolgt vollständig automatisch durch Nebenschluss- und Serienfeld der Umformer, so dass bei konstanter Generatorfelderregung die Gleichstromspannung von 500 Volt bei Leerlauf auf 550 Volts bei Vollbelastung ansteigt. Zu diesem Zwecke enthält der Umformer ein verhältnismässig schwaches Nebenschlussfeld und ein sehr starkes Serienfeld; bei Leerlauf beträgt der phasenverspätete Strom ungefähr 30 % des Vollbelastungsstromes; bei ungefähr $^3/_4$ Belastung kommt der Strom in Phase mit der Spannung, und wird bei höherer Belastung phasenverfrüht.

Eine derartige „Phasenkontrolle" der Spannung hat den grossen Vorzug, keinerlei Regulierung in Generator- oder Umformerstation zu bedürfen, ergibt also einen sehr einfachen und damit zuverlässigen Betrieb, macht aber die Benützung einer besonderen Fernleitung für jeden Umformer wünschenswert.

Ein weiterer Teil der Energie dient zu Beleuchtung und Kraftverteilung (mittels Induktionsmotoren für kleinere, Synchronmotoren für grössere Leistungen) in der Stadt Portland.

Zahllose Kraftübertragungen nach demselben Prinzip, mit Verbundumformern und Phasencontrolle für Bahnbetrieb, sind seitdem installiert worden, meist mit 25 Perioden.

Eine grössere Kraftverteilung mittels Umformer versorgt das Strassenbahnnetz von St. Paul und Minneapolis. Die Generatorstation, mit Turbinenantriebe, befindet sich in Minneapolis am Missourifluss. Dieselbe enthält 8 Dreiphasengeneratoren von je 700 Kilowatt Leistung und 3450 Volts Spannung, und 2 Gleichstromgeneratoren von 575 Volts Spannung und je 700 Kilowatt Leistung. Die Gleichstromgeneratoren speisen direkt das Leitungsnetz der Strassenbahn, die Wechselstromgeneratoren speisen dasselbe sich über die beiden Nachbarstädte ausbreitende Leitungsnetz mittels 7 Umformer von je 600 Kilowatt Leistung, die in einer Reihe Umformerstationen über die beiden Städte verteilt sind. Die Stationen in Minneapolis werden direkt mit der Generatorspannung von 3450 Volts gespeist, mittels unterirdischer Kabel, während die Station in St. Paul, die 16 km von der Generatorstation entfernt ist, mittels spannungssteigender und spannungserniedrigender Transformatoren und 10000voltigen Kabelleitungen gespeist wird.

Die Umformer sind 8polige Maschinen mit 575 Volts Klemmenspannung.

Digitized by Google

Die Generatoren sind alle in parallel geschaltet und speisen ausser den Umformern noch einen Synchronmotor von 750 Kilowatt und kleinere Motoren.

Die Periodenzahl ist 35.

Diese Anlage ist seit etwa 2 Jahren im Betriebe.

Eine interessante Umformeranlage ist in London (England) in Installation, für Stromversorgung der „Zentral-London-Untergrund-Bahn". Obgleich die Länge der Bahnstrecke nur 10 km beträgt, war direkter Gleichstrombetrieb nicht möglich, infolge des sehr grossen Verkehrs, der niedrigen staatlich erlaubten Maximalgrenze des Spannungsabfalles in der Rückleitung, und der Notwendigkeit, die Zentralstation am äusseren Ende der Bahnstrecke anzulegen. Somit wurden 3 Umformerstationen eingerichtet.

Die Generatorstation enthält 5 Dreiphasengeneratoren von je 850 Kilowatt und 5500 Volts Klemmenspannung, 25 Perioden, direkt angetrieben von Dampfmaschinen mit 94 Umdrehungen pro Minute. 6 Umformer, 12polige Maschinen von je 900 Kilowatt Leistung und 500 Volts Gleichstromspannung sind benützt.

Das Strassenbahnnetz der Stadt New York ist gleichfalls in Umwandlung zu elektrischem Betriebe begriffen, mittels Umformern, die von zwei Zentralstationen gespeist werden. Die grössere enthält 11 Generatoren von je 4600 Kilowatt Leistung (die grössten bisher gebauten Maschinen), mit 6600 Volts Klemmenspannung, 75 Umdrehungen, 25 Perioden. Vorläufig werden für Bahnbetrieb 21 Umformer installiert, von je 1000 Kilowatt Leistung und 575 Volts Klemmenspannung, 14polige Maschinen, und für Beleuchtung 5 Umformer von je 1000 Kilowatt und 10 Umformer von je 500 Kilowatt, 250 Volts.

Umformeranlagen für Bahnbetrieb in Europa sind ferner im Betriebe oder im Bau begriffen in Middleborough, Dublin (England), Paris, Nizza (Frankreich) etc.

Eine typische Umformeranlage für Beleuchtung mittels des Dreileitersystems mit 250 Volts zwischen den Aussenleitern ist in Brooklyn (New York) im Betriebe. Die Generatoren sind 6600 Volts, 25 Perioden. Ungefähr 3000 Kilowatt Leistung in Umformern sind in Unterstationen über Brooklyn und die Nachbarorte verteilt. Zwei Grössen von Umformern sind benützt, 8polige Maschinen von 200 Kilowatt Leistung und 125 Volts, und 4polige Maschinen von 100 Kilowatt Leistung und 125 Volts. Dieselben sind Nebenschlussmaschinen, und ihre Spannung kann mittels Dreiphasenspannungsregulatoren zwischen 110 und 160 Volts variiert werden.

Digitized by Google

Ausserdem enthalten die Unterstationen 12 Synchronmotoren von je 150 Kilowatt Leistung, direkt mit 6000 Klemmenspannung versorgt, deren jeder zwei Brushmaschinen für Bogenlichtbeleuchtung in Serienschaltung treibt, und drei Periodenumwandler von je 200 Kilowatt Leistung, die die Energie von 6000 Volts Dreiphasenstrom von 25 Perioden in 2400 Volts Zweiphasenstrom von 62,5 Perioden umwandeln, für Beleuchtung und Kraftverteilung in den Vorstädten, die mit dem Gleichstromnetz nicht erreichbar sind.

Aehnliche solche Beleuchtungsanlagen sind im Betriebe oder im Bau begriffen in New York (25 und 62,5 Perioden), Minneapolis (35 Perioden), Philadelphia, Boston, Cleveland (60 Perioden), Buffalo (25 Perioden), Chicago (25 Perioden) etc., mit Umformern in Leistungen von je 100 Kilowatt zu 600 Kilowatt, 125 oder 250 Volts.

Von Interesse ist die Station in Cleveland durch Benützung von Umformern, die je nach der Belastungsverteilung der Station von Zweiphasenstrom (60 Perioden) in Gleichstrom (250 Volts) oder von Gleichstrom in Zweiphasenstrom übertragen.

Die 25periodische Anlage in New York entnimmt die Dreiphasenstromenergie dem Gleichstromnetze mittels umgekehrter Umformer.

In Chicago speisen zwei Doppelgeneratoren von je 200 Kilowatt, 20 Polen, 125 Volts in parallel mit umgekehrten Umformern, von je 250 Kilowatt Leistung, die ihre Energie unter 250 Volts dem Gleichstromnetze entnehmen, das 6600voltige Dreiphasenstromfernleitungsnetz, das in Unterstationen Umformer speist.

Die Fabriken der General Electric Co. in Schenectady erhalten ihre Energie von der Turbinenstation in Mechanicville (35 km entfernt) von 5 Generatoren von je 750 Kilowatt Leistung und 12000 Volts Klemmenspannung, 40 Perioden.

Die Fernleitung liefert Gleichstrom von 250 Volt für Beleuchtung und Motorenbetrieb, mittels 4 Umformern von je 600 Kilowatt Leistung und 10 Polen, deren jeder zwei Kommutatoren enthält, und somit bei Serienschaltung der Kommutatoren 500 Volts gibt, für Prüfung von Eisenbahnapparaten. Der Prüfungsraum der Fabrik erhält mechanische Energie von zwei Synchronmotoren von je 500 und 100 Kilowatt, die direkt für 10000 Volts gewunden sind. Die städtische Strassenbahn erhält ihre Energie gleichfalls von Umformern; die Wechselstrombeleuchtung, 60 Perioden monocyklisch, mittels drei Synchronmotoren von je 250 Kilowatt, 10000 Volts.

Der grössere Teil der bisher installierten 50000 Kilowatt Generatorenleistung in Niagara Falls findet seinen Weg gleichfalls zu Um-

Digitized by Google

formern, von denen die Umformer in Niagara Falls zweiphasig, die von Fernleitungen gespeisten in Buffalo, Lockport etc. dreiphasig sind.

Die ältesten dieser Umformer sind 5 Maschinen von je 600 Kilowatt, 160 Volts, 16polige Maschinen, die die Aluminiumwerke versorgen. Drei Umformer von je 400 Kilowatt, 6 Polen in Niagara Falls, zwei in Lockport, mehrere in Buffalo etc. speisen Eisenbahnnetze mit 550 Volts, Umformer von 125 und 250 Volts speisen Gleichstrombeleuchtungsnetze mittels Dreileitersystems in Buffalo; eine grössere Anzahl Umformer mit Spannungen von 50 Volts bis 250 Volts speisen chemische Fabriken (Alkaliwerke, Natrium, Chloratfabriken etc.) in Niagara Falls etc.

Digitized by Google

Eine Methode zu experimentellen Untersuchungen an Induktionsmotoren.

Von

Ingenieur **Alexander Heyland**
in Charleroi.

Mit 26 Abbildungen.

Die vorliegende Methode soll dienen zur experimentellen Festlegung der charakteristischen Eigenschaften an Induktionsmotoren. Sie besteht im wesentlichen in der praktischen Verwertung des von mir im Jahre 1895 [1]) aufgestellten Induktionsmotorendiagrammes und basiert auf zwei einfach und schnell ausführbaren Experimentalaufnahmen am fertigen Motor. Sie gibt einen klaren Einblick in die Haupteigenschaften: Güte und Wirkungsweise des Motors. Ich habe die Methode seit Jahren im Probierraum zur Controle zwischen Berechnung und Resultat benützt und dieselbe hat mir stets die besten Dienste geleistet.

Bevor ich die Methode selbst beschreibe, sei es mir gestattet, hier kurz auf die Theorie der Induktionsmotoren und die Herleitung der erwähnten Diagramme einzugehen.

Allgemeine Theorie des Induktionsmotors.

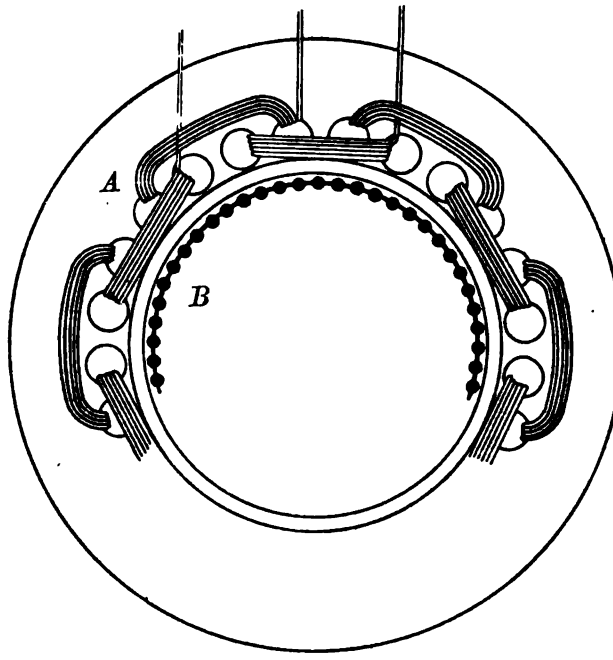
Der Induktionsmotor ist im Prinzip ein Transformator. Der Erregeranker A (Fig. 1) stellt den induzierenden oder primären Stromkreis, der Kurzschlussanker B den induzirten oder sekundären Stromkreis vor. Die Wechselfelder der einzelnen Erregerspulen setzen sich

[1]) E.T.Z. 1895, p. 649.

Digitized by Google

in bekannter Weise zusammen zu einem rotierenden Felde (Drehfeld). Der Motor ist deswegen ein Transformator mit rotierendem Felde und die jeweilige Belastung des Systems ergibt sich immer aus der Differenz zwischen der konstanten Rotationsgeschwindigkeit des vom feststehenden Erregeranker erzeugten Feldes und der Geschwindigkeit des rotierenden Kurzschlussankers B. Die Drehung kommt zu stande, indem das vom Erregeranker im Kurzschlussanker inducirte Drehfeld dort Ströme hervorruft, mit denen es ein Dreh-

Fig. 1.



moment bildet. Diese Ströme und damit auch das Drehmoment wachsen proportional dem Produkte: Ankerfeld $\times$ Schlüpfung.

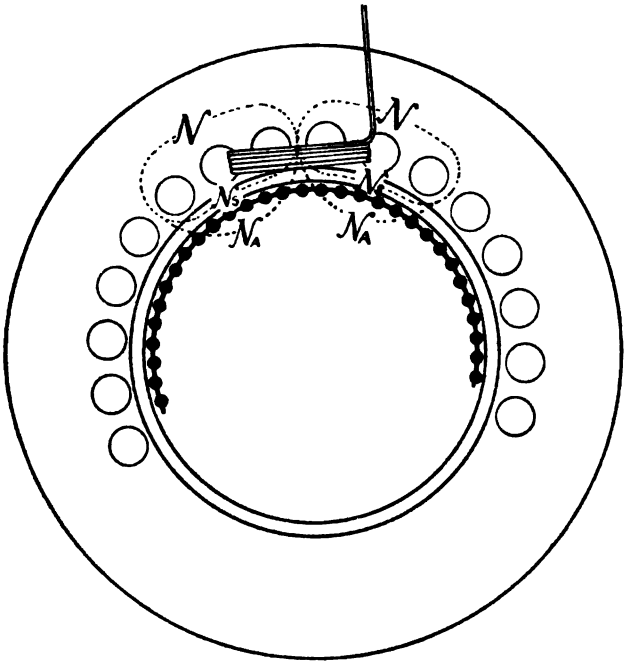
Die Differenz der Rotationsgeschwindigkeit des Erregerfeldes und der Geschwindigkeit des Kurzschlussankers wird Schlüpfung genannt. Die Zunahme der Schlüpfung hat dann prinzipiell dieselbe Bedeutung, wie beim gewöhnlichen Transformator die Zunahme der Belastung durch Aenderung des äusseren Widerstandes.

Das von der Erregerwickelung erzeugte Feld ist, bei konstanter Spannung des Stromes, für alle Belastungen von konstanter Stärke wie beim Transformator.

Digitized by Google

Das Gleiche gilt jedoch nicht für den Kurzschlussanker, welcher der eigentlich die Arbeit übertragende Teil ist. Hierin liegt der wesentliche Unterschied gegenüber dem streuungslosen Transformator, bei welchem bekanntlich das gesamte Feld der Primärwickelung auch durch die Sekundärwickelung geht. Wegen der räumlich getrennten Anordnung der Kurzschluss- und Erregerwindungen gehen nicht alle im Erregeranker erzeugten Kraftlinien N durch den Kurzschlussanker, sondern es geht ein Teil N_s direkt durch den Zwischen-

Fig. 2.



raum der beiden Wickelungen zum Erregeranker zurück und nur die jeweilige Differenz (Fig. 2)

$$N_A = N - N_s$$

geht wirklich durch den Kurzschlussanker. Dieses Feld N_A erzeugt im Kurzschlussanker Ströme, welche nach dem Induktionsgesetz $^1/_4$ Periode dem Felde nacheilen, d. h. senkrecht zum Felde stehen, und so mit dem Felde ein Drehmoment bilden gleich dem Produkte: Strom $\times$ Feld.

Die Linien N_s werden Streufeld genannt, und da sie nur von dem primären Strom J_1 erzeugt werden, so müssen sie demselben pro-

Digitized by Google

portional sein. Nennen wir den sogenannten magnetischen Widerstand des Streufeldes ρ_s, so ist:

$$N_s \equiv^{1)} \frac{J_1}{\rho_s}.$$

Das Hauptfeld ist (wie beim Transformator) von konstanter Amplitude = N.

Das Ankerfeld N_A ist dann gegeben durch die jeweilige Differenz von Hauptfeld und Streufeld:

$$N_A = N - N_s$$

und wird erzeugt durch die jeweilige Differenz der Ampèrewindungen von Primär- und Sekundärstrom. Nennen wir diesen aus Primär- und Sekundärstrom resultierenden Magnetisierungsstrom J und den sogenannten magnetischen Widerstand des Ankerfeldes ρ, so können wir schreiben:

$$N_A \equiv \frac{J}{\rho}.$$

Dieser Magnetisierungsstrom ist also nicht wie beim Transformator konstant, sondern nimmt mit wachsender Belastung ab, weil bei wachsender Belastung J_1 und damit N_s zunimmt, also N_A fällt.

Wird im Kurzschlussanker kein Strom erzeugt, so liefert die Primärwickelung nur den Magnetisierungsstrom und der Primärstrom ist gleich dem Magnetisierungsstrom

$$J_1 = J.$$

Dieser Fall tritt ein bei Leerlauf, wenn die Schlüpfung = 0 ist.

Bei zunehmender Belastung ist der Vorgang folgender: Die Schlüpfung nimmt zu und damit die im Kurzschlussanker induzierte E.M.K. und die derselben entsprechenden Ströme J_2. Dieser Sekundärstrom J_2 wirkt entmagnetisierend auf das Feld und ruft dadurch, analog wie beim Transformator, ein gleichzeitiges Anwachsen des Primärstromes im Erregeranker hervor. Die entmagnetisierende Wirkung von J_2 erstreckt sich nur auf das Ankerfeld. Es nimmt jedoch die Stärke des Streufeldes direkt proportional dem Primärstrome zu, d. h. die Zunahme der Belastung, Zunahme der Ankerströme, hat zweierlei zur Folge:

1. direkt durch die entmagnetisierende Wirkung von J_2, Abnahme des Ankerfeldes,

---

[1]) Dieses Zeichen „≡" soll bedeuten: „Proportionalität".

Digitized by Google

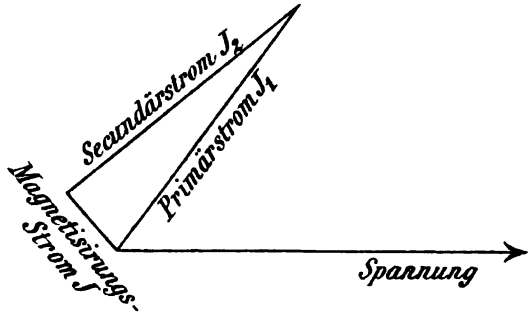
2. indirekt durch das gleichzeitige Anwachsen von J_1, Zunahme des Streufeldes.

Nach obigem ist das Streufeld direkt proportional J_1. Das Ankerfeld ist gleich der Differenz zwischen Haupt- und Streufeld; d. h. die beiden Felder müssen der Bedingung genügen, dass ihre Summe konstant, gleich dem Hauptfelde sein muss.

Diagramm des Induktionsmotors.

Wie bekannt, lassen sich im Induktionsmotor zunächst der Primärstrom der Erregerwickelung, der Sekundärstrom im Kurzschlussanker wie beim Transformator zusammensetzen zu einem Stromdreieck, dessen dritte, resultierende Seite den Magnetisierungsstrom J darstellt, wie in Fig. 3 angedeutet.

Fig. 3.



Dieser Magnetisierungsstrom liefert das Ankerfeld[1]), welches beide Wickelungen, sowohl Erreger- als auch Kurzschlussanker, durchsetzt. Dieses Ankerfeld induziert die Ströme im Kurzschlussanker und es stellt die einzigen, den Kurzschlussanker wirklich durchsetzenden Kraftlinien dar. Da die Ankerströme nur von diesem Felde erzeugt werden, müssen sie genau eine Verschiebung von 90° gegen das Ankerfeld aufweisen, wie beim Transformator, welche Verschiebung hier gleichzeitig räumlich zu verstehen ist. Entsprechend den früheren Ausführungen beruht der Unterschied zwischen dem streuungslosen Trans-

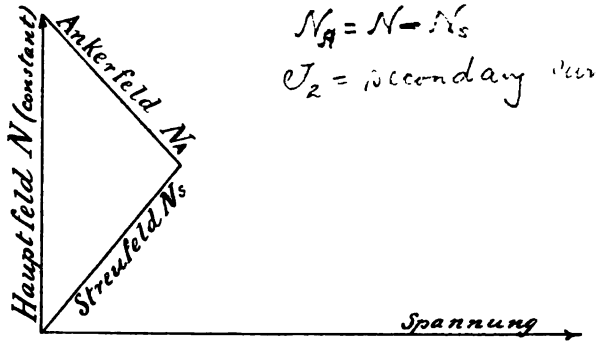
[1]) Ich mache hier darauf aufmerksam, dass in der früheren Ableitung loc. cit. des Diagrammes ein Versehen vorliegt. Nur für das Ankerfeld N_A liegen die Verhältnisse so, als wenn nur eine magnetisierende Wickelung und der Strom J bestände, während das Gesamtfeld erst aus der Summe von Anker + Streufeld entsteht.

Digitized by Google

formator und dem Induktionsmotor darin, dass dieses Stromdreieck seine Lage und die Grösse des Magnetisierungsstromes ändert. Wir wissen (Fig. 3), dass das konstante Gesamtfeld, welches eine der Klemmenspannung entsprechende E.M.K. induziert, in seiner Richtung senkrecht zur Klemmenspannung gegeben ist. Beim Transformator lag auch damit der Magnetisierungsstrom J senkrecht zur Klemmenspannung und war konstant, d. h. das Stromdreieck behielt stets dieselbe Lage.

Beim Induktionsmotor zerlegt sich aber das Hauptfeld in zwei Teile, von denen der eine Teil, das Streufeld, die Richtung vom Primärstrom hat und mit diesem Strom wächst. Hiedurch muss auch das Restglied, das Ankerfeld, veränderlich sein und eine andere Richtung haben als die Summe: das Hauptfeld. Der Magnetisierungsstrom, der es erzeugt, muss daher seine Grösse und Richtung ändern. Es lässt sich diese Aenderung durch die Zusammensetzung der Felder verfolgen (Fig. 4).

Fig. 4.



Das seiner Zeit von mir entworfene Diagramm beruht auf diesen Voraussetzungen und ist in Fig. 5 dargestellt.

Der Primärstrom erzeugt das durch ihn direkt gegebene und mit ihm in gleicher Phase gelegene Streufeld

$$N_s \equiv \frac{J_1}{\rho_s} = AC'.$$

Wir können also dasselbe in einem bestimmten Massstab direkt durch den Vektor $AC' = J_1$ ausdrücken.

Das Hauptfeld sei gegeben durch die konstante AD senkrecht zur Klemmenspannung:

$$N \equiv AD.$$

Digitized by Google

Das Restglied C′ D muss dann das Ankerfeld darstellen oder

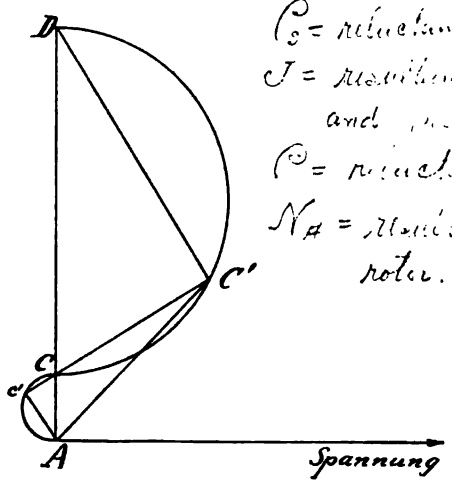
$$N_A = \frac{J}{\rho} = C'D$$

und es muss C′ D senkrecht auf c′ C′ = J_2 und parallel zu A c′ = J sein. Dabei muss zwischen C′ D und A c′ ein konstantes Verhältnis bestehen entsprechend obiger Gleichung:

$$\frac{C'D}{A\,c'} = \frac{N_A}{J} = \frac{1}{\rho}.$$

Wenn sich jetzt die Belastung ändert, so müssen sich, damit diese Gleichung bestehen bleibt, die Punkte c′ und C′ auf zwei Halb-

Fig. 5.



kreisen (Fig. 5) bewegen. Die Winkel c′ und C′ sind dann immer 90° und das Verhältnis $\frac{C'D}{A\,c'}$ ist konstant.

Wir sehen dann aus der Figur, dass der Strom nicht unbegrenzt wachsen kann, auch wenn wir annehmen, dass die Widerstände verschwindend klein werden. Er erreicht schon bald ein Maximum, nämlich wenn C′ in D fällt:

$$J_1 = A\,D.$$

Das dann gleichzeitig durch A D dargestellte Streufeld erreicht die Stärke des Hauptfeldes und das Restglied, das Ankerfeld, wird = 0.

In diesem Fall ist

$$N = N_s = \frac{J_1}{\rho_s} = \frac{A\,D}{\rho_s}.$$

Digitized by Google

Vergleichen wir das mit dem Minimum im entlasteten Zustande.

Das Minimum tritt ein, wenn der Motor unbelastet ist. Es wird dann $J_2 = 0$, also J_1 gleich dem Magnetisierungsstrom

$$J_1 = J = AC,$$

so ist

$$N \equiv \frac{J}{\rho} \equiv \frac{J_1}{\rho} \equiv \frac{AC}{\rho}$$

oder, da N konstant geblieben, ist das Verhältnis $\frac{\text{Maximum}}{\text{Minimum}}$ des Stromes $= \frac{AD}{AC} = \frac{\rho_s}{\rho} =$ Magnetwiderstand $\frac{\text{Streufeld}}{\text{Ankerfeld}}$.

Dies liefert uns den Satz: Bei Induktionsmotoren lassen sich die Beziehungen zwischen Spannung und Phasenverschiebung durch ein Vektordiagramm darstellen, in welchem der mit der Belastung veränderliche, den Strom darstellende Vektor dadurch bestimmt ist, dass der Endpunkt sich auf einem Kreise bewegt, dessen Lage durch das Verhältnis $\frac{AD}{AC} = \frac{\rho_s}{\rho}$ = magnetischer Widerstand $\frac{\text{Streufeld}}{\text{Ankerfeld}}$ definiert ist.

Bestimmung der mechanischen Grössen.

Wir haben in den bisherigen Untersuchungen des Diagrammes lediglich die elektrischen Grössen: Stromverlauf und Phasenverschiebung hergeleitet. Um demselben jedoch praktische Verwendbarkeit zu geben und Wirkungsweise und Güte eines Motors aus demselben zu entwickeln, müssen noch die Reibungs- und Eisenverluste und vor allem die elektrischen Verluste in dem Diagramm zum Ausdruck gebracht werden.

Die Reibungs- und Eisenverluste sind, da die Geschwindigkeit des Motors bei Leerlauf und Vollbelastung nur wenig variiert und auch das Erregerfeld dasselbe bleibt, als annähernd konstant zu betrachten. Die Verluste im Eisen des Kurzschlussankers kann man wegen der geringen Wechselzahl vernachlässigen. Wir werden später sehen, dass das Erregerfeld unter dem Einfluss der Ohmschen Spannungsverluste nicht ganz konstant bleibt, sondern fällt, dafür wachsen aber im Kurzschlussanker bei wachsender Belastung die Eisenverluste, durch die zunehmende Schlüpfung. Beide Wirkungen werden sich annähernd aufheben, so dass die Summe doch konstant bleibt.

Anders verhält es sich mit den Kupferverlusten. Dieselben wachsen bekanntlich mit der zweiten Potenz des Stromes. Ihre Ver-

Digitized by Google

folgung in einem Diagramm ist deshalb ohne weiteres recht schwierig. Wir werden jedoch sehen, dass sie sich noch auf eine andere Weise äussern, nämlich durch eine Schwächung des Feldes und zwar derart, dass sie ausserordentlich einfach zu berücksichtigen sind. Der elektrische Spannungsverlust der Primärwickelung $J_1 \times W_1$ (J_1 = Strom; W_1 = Ohmscher Widerstand) subtrahiert sich bekanntlich von der Klemmenspannung und hat zur Folge, dass das Feld nicht eine, der Klemmenspannung gleiche gegenelektromotorische Kraft, sondern nur eine der Differenz von Klemmenspannung — Spannungsverlust entsprechende zu induzieren hat. Das hat zur Folge, dass das, diese Gegen-E.M.K. induzierende Hauptfeld und damit auch das Ankerfeld um einen dem Spannungsabfall entsprechenden Wert kleiner ausfällt.

Das Diagramm war aber konstruiert auf der Basis eines konstanten Hauptfeldes. Doch diese Vernachlässigung ändert nichts an der Richtigkeit des Diagrammes: Wir können nämlich diese Ohmschen Verluste berücksichtigen durch Einführung eines ihnen entsprechenden äquivalenten Feldes, das dann nachträglich, um zu richtigen Resultaten zu gelangen, von dem resultierenden Ankerfelde zu subtrahieren ist.

Da einer E.M.K. immer ein zu ihr senkrechtes proportionales Feld entspricht, so lässt sich auch jeder Spannungsverlust berücksichtigen durch eine Reduktion des Feldes, um einen dem Verlust proportionalen Betrag, senkrecht zum Spannungsabfall, d. h. senkrecht zur Richtung des Stromes [1]).

Wir können also mit einem unserem Diagramme zu Grunde liegenden konstanten Hauptfeld rechnen, wenn wir nachträglich das Ankerfeld um den dem Spannungsverlust entsprechenden Betrag verringern.

Dieses ist aber im Diagramm leicht auszuführen. Es zerfällt im Diagramm der Primärstrom AC' in zwei Komponenten AC und CC', von denen der Leerstrom AC zu den konstanten Verlusten zählt. Die veränderliche Komponente CC' ruft dann einen Spannungsverlust hervor, der sich durch eine diesem Strome proportionale Verringerung des zu ihm senkrechten Feldes, also N_A äussert. Mit anderen Worten: das Ankerfeld braucht, da ein Teil der zugeführten Spannung bereits durch den Ohmschen Spannungsabfall aufgehoben wird, nur um diesen dem Spannungsverlust entsprechenden Teil kleiner auszufallen.

---

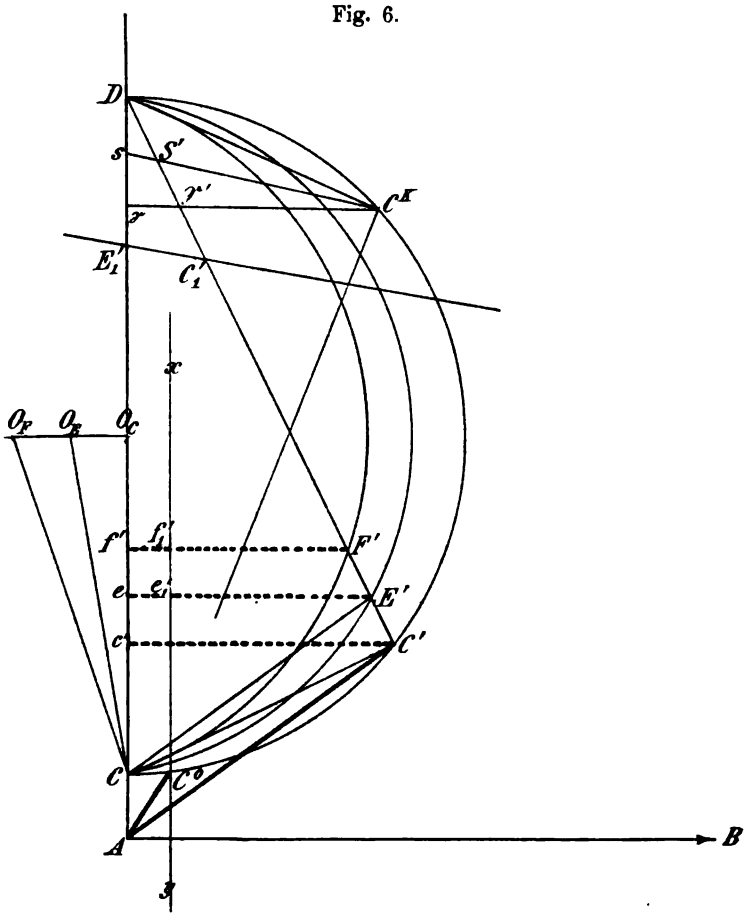
[1]) Diese Berücksichtigung des Ohmschen Spannungsabfalles durch Reduktion des Feldes entspricht meinen Ausführungen im Vortrag, gehalten im Verband Deutscher Elektrotechniker. E.T.Z. 1896.

Digitized by Google

Nennen wir diesen sich subtrahierenden Teil C′E′, so muss derselbe proportional C C′ sein, d. h. der Punkt E′ muss sich auf dem zweiten eingezeichneten Kreise bewegen. Dieser Kreis bedeutet dann, dass das Ankerfeld nicht wie früher durch D C′, sondern durch D E′ dargestellt wird.

Das Hauptfeld fällt natürlich um den gleichen Betrag. Da wir

Fig. 6.



jedoch dasselbe zu unseren weiteren Untersuchungen nicht mehr gebrauchen, so ist es nicht nötig, dies im Diagramm zu vermerken.

In gleicher Weise äussert sich der Verlust im Kurzschlussanker durch das Stück E′F′.

Indem wir in dieser Weise den Ohmschen Verlust in beiden Wickelungen, durch die ihnen entsprechende Reduktion des Anker-

Digitized by Google

feldes berücksichtigen, sind wir in der Lage, die mechanischen Grössen: Zugkraft, Leistung etc. direkt ohne weitere Berechnung herzuleiten.

a) Die verbrauchte elektrische Energie

$$= 3\,e\,.\,i\,\cos\varphi \text{ oder } = \sqrt{3}\,E\,i\,\cos\varphi$$

lässt sich messen, da die Klemmenspannung konstant ist, durch die Wattkomponente des Primärstromes A C', d. h. durch die Abscisse C' c'.

$$\text{Verbrauchte Energie} \equiv C'\,c'.$$

b) Die Zugkraft ist bestimmt, durch das Produkt Ankerfeld $\times$ Sekundärstrom $\equiv E'\,D \times C'\,C$, d. h. durch den Inhalt des Dreiecks C E' D (da E' D Grundlinie und C' C Höhe dieses Dreiecks ist). Da nun eine Seite C . D konstant bleibt, so kann man den Inhalt auch durch die zu dieser Seite gehörige Höhe E' e' darstellen, d. h. die Zugkraft ist proportional der Abscisse des Punktes E'.

Wir wissen aber noch, dass auch eine Anzahl konstante Verluste auftreten, gegeben durch Lager- und Luftreibung, Eisenverluste und den Jouleschen Verlust des Leerstromes. Da diese Verluste konstant sind, äussern sie sich durch eine konstante Verringerung der Zugkraft, z. B. um ein Stück $e'\,e_1'$. Dieses lässt sich im Diagramm einfach dadurch berücksichtigen, dass man zur Ordinatenaxe eine Parallele x y zieht im Abstande $e'\,e_1'$, und dann die Zugkraft erhält als Abscisse der Strecke $e_1'\,E'$, also

$$\text{Zugkraft} \equiv e_1'\,E'.$$

c) Die Leistung ergibt sich dann in gleicher Weise unter Berücksichtigung der Verluste im Kurzschlussanker E F' als reduzierte Höhe des Dreiecks C F' D.

$$\text{Leistung} \equiv f_1'\,F'.$$

d) Die Schlüpfung schliesslich resultiert daraus, dass die im Kurzschlussanker induzierten Ströme proportional Ankerfeld $\times$ Schlüpfung sind oder:

$$\text{Schlüpfung proportional } \frac{\text{Ankerstrom}}{\text{Ankerfeld}} \equiv \frac{C'\,C}{E'\,D}.$$

Es ist nun C' C proportional E' C oder auch Schlüpfung $\equiv \frac{E'\,C}{E'\,D}$.

Zieht man nun an irgend einer Stelle oben im Diagramm eine Gerade $E_1'\,C_1'$, so dass der Winkel $D\,E_1'\,C_1' = D\,E'\,C$ dem konstanten Peripheriewinkel zu C D ist, so wird

$$\frac{E'\,C}{E'\,D} = \frac{E_1'\,C_1'}{E_1'\,D}.$$

Digitized by Google

In diesem Verhältnis bleibt $E_1' D$ immer konstant, so dass

$$\frac{E' C}{E' D} \equiv E_1' C_1'$$

ist, d. h. Schlüpfung $\equiv E_1' C_1'$.

Wir haben somit an $E_1' C_1'$ einen Massstab, der das Anwachsen der Schlüpfung direkt ablesen lässt.

Um jetzt noch den absoluten Wert der Schlüpfung zu finden, ist z. B. der Punkt aufzusuchen, wo die Schlüpfung 100 % wird, d. h. wo der Motor stillsteht. In diesem Fall muss die Leistung 0 werden, d. h. der Punkt F' in D fallen. Dieser Fall tritt ein, wenn C' in C^K fällt und $C^K D$ Tangente am Kreise O_F wird. Ziehen wir jetzt noch eine Linie durch C^K parallel zu $E_1' C_1'$, d. h. die Linie $s C^K$, so schneidet $D C'$ hierauf ein Stück $s s'$ ab, welches proportional $E_1' C_1'$ ist, also auch die Schlüpfung misst und zwar jetzt direkt im Verhältnis zu $s C^K$ (Schlüpfung 100 %), d. h. es ist

$$\text{Schlüpfung} = s S'.$$

Erwähnt sei schliesslich noch der elektrische Wirkungsgrad.

Der elektrische Verlust in Prozenten der verbrauchten Energie ist proportional:

$$\frac{\text{Ankerstrom}^2}{\text{Verbrauchte Energie}} \equiv \frac{C' C^2}{c' C'} \equiv \frac{C' C}{C' D}$$

(weil $c' C' \equiv C' C \times C' D$).

Zieht man von C^K eine Linie C_γ je senkrecht zu $A D$, so lässt sich das Verhältnis (ähnlich wie die Schlüpfung) direkt ablesen durch ein Stück $\gamma \gamma'$ und schliesslich der elektrische Wirkungsgrad durch das Restglied, d. h.

$$\text{Elektrischer Wirkungsgrad} = C^K \gamma'.$$

Das Diagramm in dieser Gestalt gibt nun über alle in Frage kommenden Verhältnisse Aufschluss.

Bei Leerlauf (Fig. 7) ist der Punkt C^0 allein bestimmt durch die Leerverluste, die konstanten Reibungs- und Eisenverluste und die Kupferverluste des Magnetisierungsstromes. Diese Verluste äussern sich darin, dass zu dem Magnetisierungsstrom $A C$ sich noch ein jene Verluste deckender Wattstrom $C C^0$ addiert, so dass der Leerstrom $A C^0$ wird. Zugkraft und Leistung sind $= 0$ und die Schlüpfung ist sehr klein.

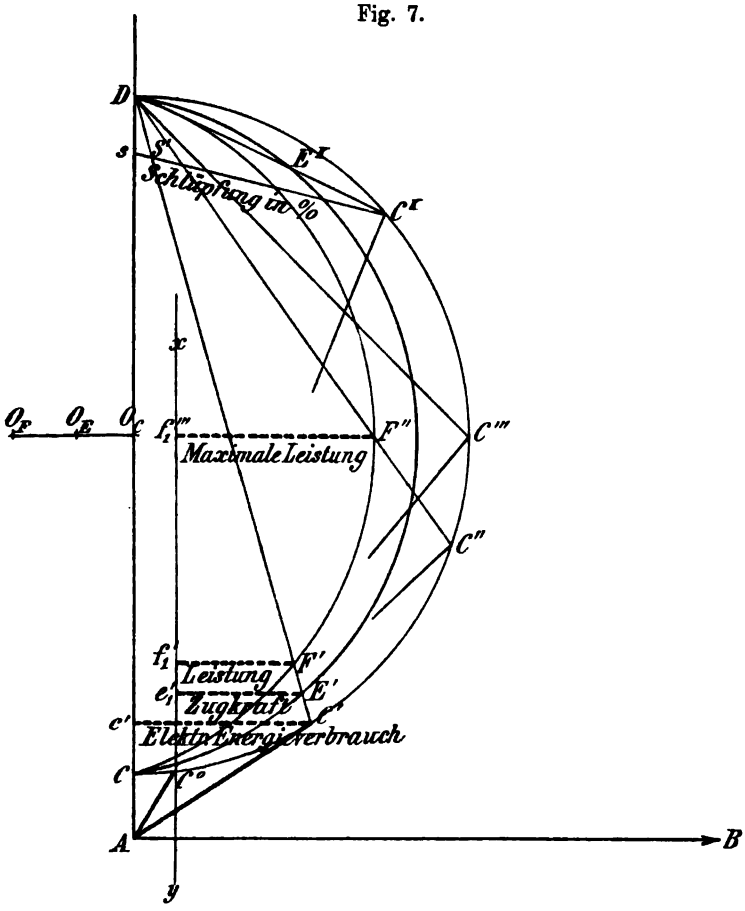
Mit wachsender Belastung bewegt sich der Punkt C' weiter auf dem Kreise, die Phasenverschiebung φ zwischen Spannung und

Digitized by Google

Strom nimmt ab (cos φ wächst). Im Punkte C′ (wo A C′ Tangente am Kreise) wird die Phasenverschiebung ein Minimum. Die Zugkraft ist e′ E′, die Leistung f′ F′ und die Schlüpfung ist s S′ geworden.

Diese Leistung wächst weiter mit zunehmender Schlüpfung und erreicht schliesslich ein Maximum in F″.

Fig. 7.



Wächst die Schlüpfung noch weiter, so nimmt die Leistung wieder ab, die verbrauchte Arbeit wächst noch etwas, fällt aber dann auch, indem die Phasenverschiebung schnell zunimmt. Die Leistung wird schliesslich = 0, wenn die Schlüpfung gleich 100% ist und der Punkt s′ in C^K fällt. Die ganze zugeführte Arbeit wird dann im Motor vernichtet.

Digitized by Google

Praktische Anwendung des Diagramms.

Bis hieher haben wir an Hand lediglich theoretischer Ueberlegungen alle Verhältnisse voll und endgültig hergeleitet und es bleibt uns nur noch die weitere Aufgabe, an Hand praktischer Aufnahmen die Uebereinstimmung zwischen Theorie und Praxis zu zeigen.

Haben wir einen fertigen Motor vor uns, so bedürfen wir, um seine Güte und Wirkungsweise an Hand des Diagrammes vorher aus seinen Konstanten bestimmen zu können, der Kenntnis folgender Grössen.

1. Verhältnis der magnetischen Widerstände $\frac{\text{Streufeld}}{\text{Hauptfeld}}$,
2. Widerstände der Stromkreise,
3. Eisen und Reibungsverluste,
4. Leerstrom,
5. Kurzschlussstrom.

Verschiedene dieser Grössen, wie z. B. die magnetischen Widerstände lassen sich durch eine direkte Messung gar nicht bestimmen. Nach unseren früheren Ausführungen würde es möglich sein, diese Widerstände zu messen, wenn im Motor gar keine Verluste aufträten, also die elektrischen Widerstände = 0 wären. Würde man dann nämlich einmal bei offenem und einmal bei kurzgeschlossenem Kurzschlussanker den Primärstrom messen, so würde derselbe einmal A C und bei kurzgeschlossenem Anker A D sein und das Verhältnis $\frac{A\,D}{A\,C}$ gleich dem Verhältnis

$$\frac{\text{Magnetischer Widerstand des Streufeldes}}{\text{Magnetischer Widerstand des Hauptfeldes}}$$

sein.

Wie oben gezeigt wurde, treten aber infolge der Verluste thatsächlich nur die Punkte C^0 und C^K auf. Nun sind aber diese Punkte ausserordentlich leicht aufzunehmen und man kann dann aus ihnen den Mittelpunkt des Kreises O_0, auf dem sie liegen müssen, bestimmen. Wir finden dann die Punkte C und D und alle anderen charakteristischen Punkte in einfacher Weise.

Wir haben nur mit Ampèremeter und Wattmeter zwei Aufnahmen auszuführen.

1. Bei Leerlauf: Strom $A\,C^0$ und den Winkel der Phasenverschiebung $\varphi = C^0\,A\,B$.

Digitized by Google

2. Bei Stillstand (bei festgebremstem Motor): den Strom $A C^K$ und den Winkel der Phasenverschiebung $\varphi = C^K A B$.

Ist es nicht möglich, dem Motor den vollen Kurzschlussstrom zu geben, so genügt es auch, diese Aufnahme bei einer niedrigeren Spannung zu machen. Der wahre Kurzschlussstrom ergibt sich dann proportional der Spannung. Zeichnet man dann die Richtung der Klemmenspannung A B, die Richtung und Grösse des Leerstromes $A C^0$ und die Richtung und Grösse des Kurzschlussstromes $A C^K$, so ist der Mittelpunkt O_c des Kreises dadurch bestimmt, dass er auf der Senkrechten zu A B liegen muss. Misst man dann drittens noch den Widerstand der Erregerwickelung W_1, so lässt sich mit Hilfe von $J_1 \times W_1$ der Punkt E^K finden und weiter der Mittelpunkt O_E und O_F und die Schlüpfungslinie $S C^K$, d. h. die zwei einfachen Aufnahmen bei Leerlauf und Stillstand genügen also, um über alle charakteristischen Punkte Klarheit zu verschaffen und die Belastungskurven zu konstruieren. Da der Motor hiebei nur bei Leerlauf und Stillstand untersucht wird, so macht die Methode jede genaue Belastungsprobe überflüssig.

Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens ist der, dass das Diagramm einen schnellen Aufschluss gibt über den Grund der verschiedenen Charakteristika des Motors, und angibt, welche Verhältnisse geändert werden müssen, um den einen oder anderen Zweck zu erreichen.

Bei einem Motor mit geringen elektrischen Verlusten z. B. wird das Stück $E^K D$, das diese Verluste darstellt, sehr klein ausfallen, es wird also der Punkt E^K sehr hoch liegen und damit die Anzugskraft $E^K e^K$ gering sein. Man vermeidet das bekanntlich, indem man unter Zuhilfenahme von Schleifringen Anlasswiderstände in die Stromkreise des Kurzschlussankers bringt. Will man Schleifringe vermeiden, so darf man den Widerstand des Kurzschlussankers nicht zu klein machen. Die Punkte E^K und C^K fallen dann tiefer, desgleichen die Schlüpfungslinie $S C^K$ und die Schlüpfung variiert stärker. Der Motor erhält bei Belastung grössere Geschwindigkeitsschwankungen und einen schlechteren Wirkungsgrad.

Man kann auch eine günstige Anzugskraft erzielen ohne die Verluste in dem Masse zu steigern, wenn man den Motor so konstruiert, dass die normale Belastung bereits in einem Punkte weit vor C′ liegt, d. h. wenn man das Feld stark macht, dann aber wird der Magnetisierungsstrom im Verhältnis zum Wattstrom sehr gross und der cos φ ungünstig klein, auch wird ein solcher Motor verhält-

Digitized by Google

nismässig gross ausfallen. Die Motorgrösse ist im allgemeinen durch den Maximalwert der Leistung in C‴ bestimmt und die normale Leistung in C C′ ergibt sich daraus, welche Ueberlastungsfähigkeit man erreichen will.

Diesem Gesichtspunkte entspricht auch die Streuungskonstante von Rothert [1]), welche für jede Ueberlastungsfähigkeit ein bestimmtes Verhältnis zwischen Strom und Feld fixiert. Im Diagramm ist dieses Verhältnis durch $\frac{C\,C'}{C'\,D}$ ausgedrückt, d. h. durch die Tangente des Winkels C′ D C. Wird dieser Winkel 45°, so erreicht der Motor seine Maximalbelastung. Je kleiner dieser Winkel, desto überlastungsfähiger ist der Motor. Rothert berücksichtigt in seiner Konstante nicht den Magnetisierungsstrom. Die Ueberlastungsfähigkeit einer bestimmten Motortype ist dadurch begrenzt, dass der Magnetisierungsstrom schliesslich sehr stark ausfällt (grosse Phasenverschiebung), d. h. durch Verschlechterung von cos φ.

Der Magnetisierungsstrom bestimmt sich durch den Luftzwischenraum. Aendert man den Luftweg, so ändert sich der Magnetisierungsstrom A C, während alles oberhalb des Punktes C unverändert bleibt. Man kann deshalb wie Rothert sagen: abgesehen vom Magnetisierungsstrom ist das Diagramm für alle mehrphasen Motoren identisch. Die Ueberlastungsfähigkeit C‴ ist gegeben durch den Wattstrom, also den Radius des Kreises. Bei doppelter Ueberlastungsfähigkeit z. B. entspricht die normale Belastung dem halben Radius. Ein Strom, der für die Leistungsfähigkeit des Motors bezeichnend ist, ist der Kurzschlussstrom und da derselbe ungefähr dem Durchmesser gleich ist, so kann man die Faustregel aufstellen: die normale Leistung eines Motors entspricht etwa $^1/_4$ seines Kurzschlussstromes, d. h. hat ein Motor von 100 Volt einen Kurzschlussstrom von 100 Ampère, so entspricht die normale Leistung $^1/_4 \times 100 \times 100 \times \sqrt{3} = 4300$ Watt oder bei 75 % etwa 5 PS., d. h. die normale Leistung entspricht $^1/_4$ des Stromes, ist also proportional dem Strom, der ausreicht, das gesamte Feld durch den Luftraum zu treiben.

Dieser Strom wächst bei konstanter Spannung offenbar umgekehrt mit dem Quadrate der Windungszahl, ferner mit der Länge des Streufeldes, also mit dem Durchmesser $d_{(b)}$ und drittens umgekehrt mit der Breite des Motors also,

$$L \equiv \frac{d}{b}\,\frac{1}{m^2}.$$

[1]) E.T.Z. 1898, p. 321.

Digitized by Google

Um die Leistungsfähigkeit zu steigern, soll also d gross und b klein gemacht werden.

Es sind dies interessante und dabei ausserordentlich einfache Gesichtspunkte, die bei einiger Uebung vorzügliche Dienste leisten.

Wenn man bedenkt, dass man m durch $\frac{\text{Spannung}}{N}$ und L durch Spannung $\times$ Strom i ersetzen kann, so erhält man alle Grössen der Rothertschen Streuungskonstante

$$\frac{m \,.\, i \,.\, b}{N \,.\, d}.$$

Bei der Konstruktion normaler Motoren sind neben geringer Erwärmung, d. h. gutem Wirkungsgrade in der Hauptsache folgende Regeln massgebend.

1½- bis 2fache Ueberlastungsfähigkeit und normale Anzugskraft bei mässigem Stromverbrauche; kleiner Leerstrom, je nach Grösse des Motors ⅓ bis ⅕ des Normalstromes.

Geringe Phasenverschiebung, guter cos φ, mässiger Geschwindigkeitsabfall.

Alle diese Punkte sind besonders bei kleineren Motoren schwer gleichzeitig zu erreichen, indem immer ein zu viel in der einen Richtung, ein zu wenig in der anderen mit sich bringt.

Untersuchungen an Motoren.

Nachfolgend seien die vorhergehenden Ueberlegungen noch an einigen Beispielen erläutert. Die Motoren wurden bei der „Société Electricité et Hydraulique" gebaut und sollten der Bedingung genügen, eine doppelte Anzugskraft zu entwickeln.

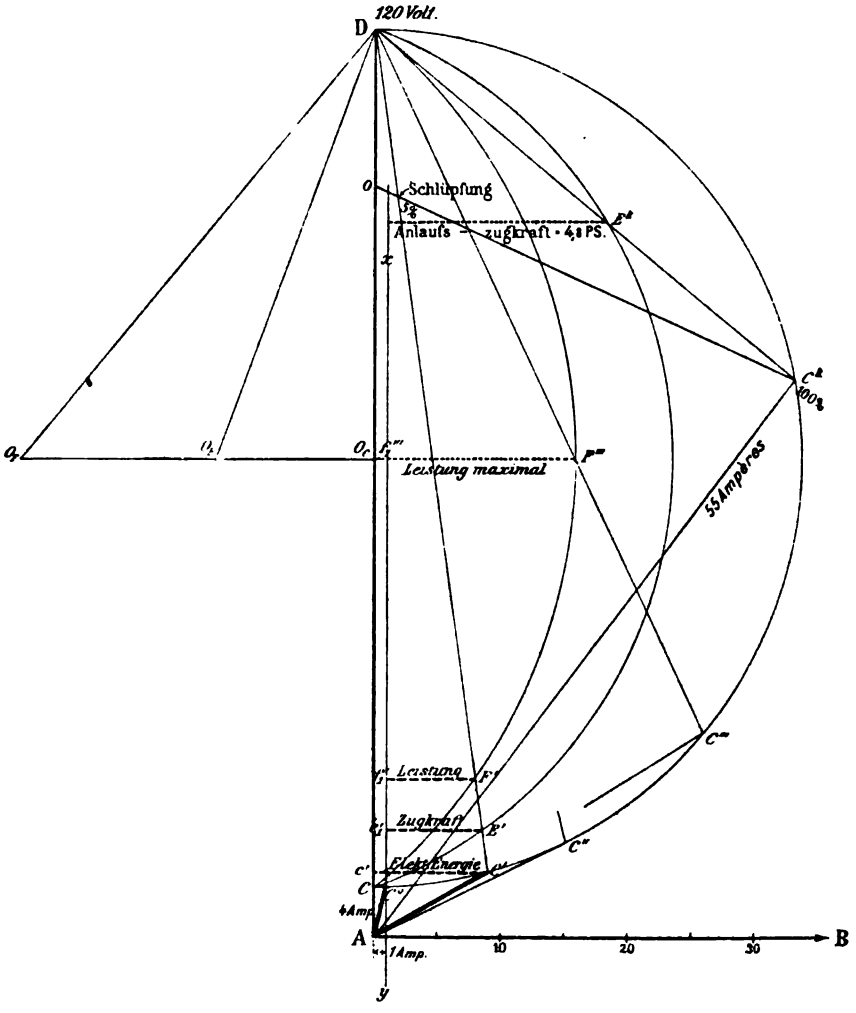
Motor von 2 PS.

1. Bei Leerlauf unter 120 Volt
   4,1 Ampère,
   210 Watt.
2. Bei Kurzschluss unter 120 Volt
   55 Ampère,
   6940 Watt.
3. Widerstand pro Phase
   0,344 Ohm.

Nach diesen Daten wurde das Diagramm (Fig. 8) konstruiert.

Digitized by Google

Fig. 8.



Bei Leerlauf zunächst entspricht den 210 Watt ein Wattstrom von $J_w = \frac{210}{\sqrt{3} \cdot 120} = 1$ Ampère.

Hieraus ergibt sich das Stromdreieck A C C⁰ bei Leerlauf, in welchem

A C⁰ der Leerstrom = 4,1 Ampère,
C C⁰ der Wattstrom = 1 Ampère,
A C der Magnetisierungsstrom = 4 Ampère ist.

Digitized by Google

Der Wattstrom $C C^0$ repräsentiert hier die Leerverluste durch Reibung, Hysteresis und Wirbelströme. Diese Verluste sollen für alle Belastungen konstant sein. Sie sind daher dadurch zu berücksichtigen, dass die mechanische Leistung immer um diesen konstanten Betrag zu verringern ist, was z. B. dadurch geschehen kann, dass wir eine Parallele $x y$ durch C^0 zu $A C$ ziehen und später die erhaltene Leistung immer von dieser Geraden $x y$ aus messen, so dass z. B. für den Punkt C' die verbrauchte Energie $C' c'$, die Zugkraft $E' e'$ und die Leistung $f' F'$ ist.

Aus der Kurzschlussmessung ergibt sich ein Wattstrom

$$\frac{6940}{120\sqrt{3}} = 33{,}5 \text{ Ampère}$$

oder

$$\cos \varphi = \frac{33{,}5}{55} = 0{,}61.$$

Dieser Wert liefert uns den Punkt C^K des Diagrammes, indem

$$A C^K = \text{der Kurzschlussstrom} = 55 \text{ Ampère}$$

und

$$\cos C^K A B = \text{Leistungsfaktor} = 0{,}61$$

ist.

Aus diesen Punkten C^0 und C^K ist nun leicht der Mittelpunkt O_c und der entsprechende Kreis $C C^0 C^K D$ zu finden, wodurch das Diagramm bestimmt ist.

Ziehen wir jetzt die Gerade $C^K D$, so ist der Kreis, welcher die mechanische Leistung bestimmt, dadurch festgelegt, dass die Leistung bei Stillstand für den Punkt $C^K = 0$ sein muss, d. h. der Schnittpunkt der Geraden $C^K D$ mit diesem Kreise muss in D fallen. Die Linie $C^K D$ muss also Tangente an diesem Kreise sein. Hiedurch ist auch der Mittelpunkt O_E bestimmt und der Kreis für E'.

Die sich so ergebende mechanische Leistung ist noch, wie wir gesehen hatten, um den konstanten Betrag der Leerverluste zu verringern, der durch die Parallele $x y$ gegeben war. Sie wird $E' e'$ etc.

Um schliesslich den dritten Kreis für die Zugkraft zu erhalten, ist zu bedenken, dass die Linie $C^K D$ den elektrischen Verlusten bei Kurzschluss entspricht und sich auf die Erreger- und Kurzschlussankerwickelung im Verhältnis der betreffenden Widerstände verteilt. Da das Gesamtfeld $A D$ einer Spannung = 120 Volt entspricht, so

Digitized by Google

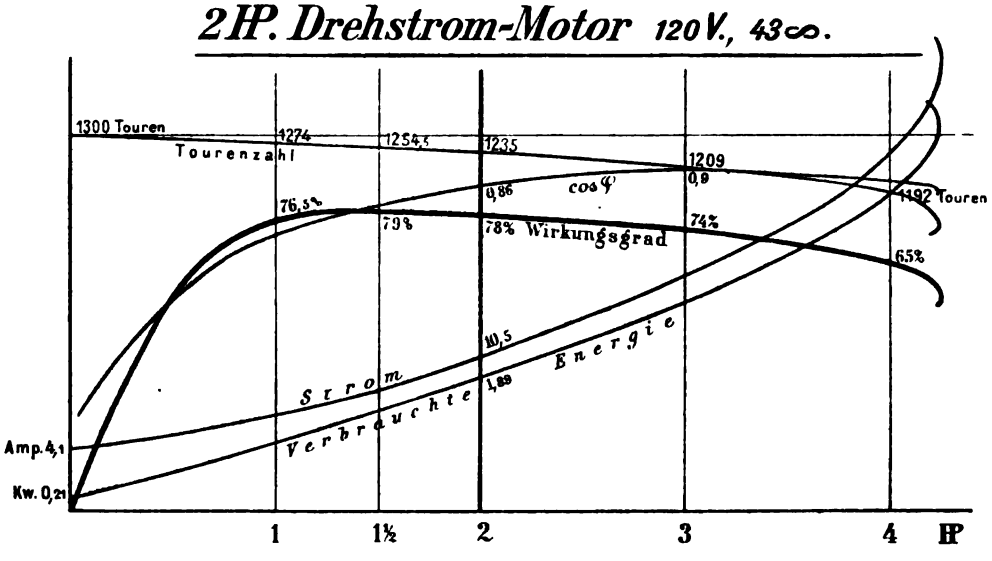
entfallen auf den Verlustvektor bei Kurzschluss in demselben Massstab gemessen

$$C^K D \times \frac{120}{A D} = 73 \text{ Volt.}$$

In der Erregerwickelung, deren Widerstand pro Phase 0,344 Ohm ist, gehen bei Kurzschluss 55 Ampère verloren

$$\sqrt{3} \cdot 55 \cdot 0{,}344 = 32{,}7 \text{ Volt.}$$

Fig. 9.



Tragen wir diesen Wert im Massstabe $\frac{32{,}7}{73}$ von C^K aus auf $C^K D$ ab $= C^K E^K$, so ist durch den Punkt E^K der Kreis, der die Zugkraft bestimmt, festgelegt und damit der Mittelpunkt O_E.

Schliesslich ziehe man noch von C^K aus $C^K s$ senkrecht zu $O_E D$, dann gibt diese Linie für jeden Belastungsfall die entsprechende Schlüpfung an. Bei Leerlauf ist sie gleich 0, bei normaler Belastung 5 %.

Das Diagramm gibt jetzt über alle wissenswerten Punkte Aufschluss. Man kann die diversen Grössen direkt mit dem Zirkel abgreifen und in Kurven abtragen, wie in Fig. 9 geschehen ist.

Der Motor leistet normal 2 PS. bei 78 % Wirkungsgrad, cos φ = 0,86 und 5 % Schlüpfung. Er ist also mehr als das Doppelte über-

Digitized by Google

lastbar, der cos φ steigt bis 0,9 Maximalwert. Schliesslich läuft er nach Fig. 8 Punkt C^K mit 55 Ampère und 4 PS. Zugkraft an. Er erfüllt also alle oben an ihn gestellten Bedingungen.

Motor von 7 PS.

Die Versuche eines 7 PS.-Motors ergaben die nachfolgenden Daten, welche wir auf eine Phase beziehen.

1. Bei Leerlauf unter 110 Volt Phasenspannung
   J = 6,3 Ampère,
   a = 100 Watt.
2. Bei Kurzschluss unter 110 Volt Phasenspannung
   J = 118 Ampère,
   a = 6670 Watt.
3. Widerstand pro Phase
   0,142 Ohm.

Nach diesen Ergebnissen ist das Diagramm (Fig. 10) konstruiert. Der Wattstrom ist hier bei Leerlauf $J_w = \frac{100}{110} = 0{,}91$ Ampère und wir haben somit die drei Seiten des Stromdreieckes A C C^0 bei Leerlauf, in welchem:

A C^0 der Leerstrom = 6,3 Ampère,
C C^0 der Wattstrom = 0,91 Ampère,
A C der Magnetisierungsstrom = 6,2 Ampère ist.

Um die Leerverluste zu berücksichtigen, ziehen wir, den früheren Ausführungen entsprechend, eine Parallele x y zu A C, welche durch den Punkt C^0 geht. Dann ist bekanntlich die mechanische Leistung immer von dieser Geraden aus zu messen, weil die konstant bleibenden Verluste des Motors von der genannten Leistung zu subtrahieren sind.

Die Messung bei Kurzschluss gibt uns einen Wattstrom von

$$\frac{6670}{110} = 60{,}7 \text{ Ampère} = i \cos \varphi$$

oder

$$\cos \varphi = \frac{60 . 7}{118} = 0{,}515 = \text{Leistungsfaktor.}$$

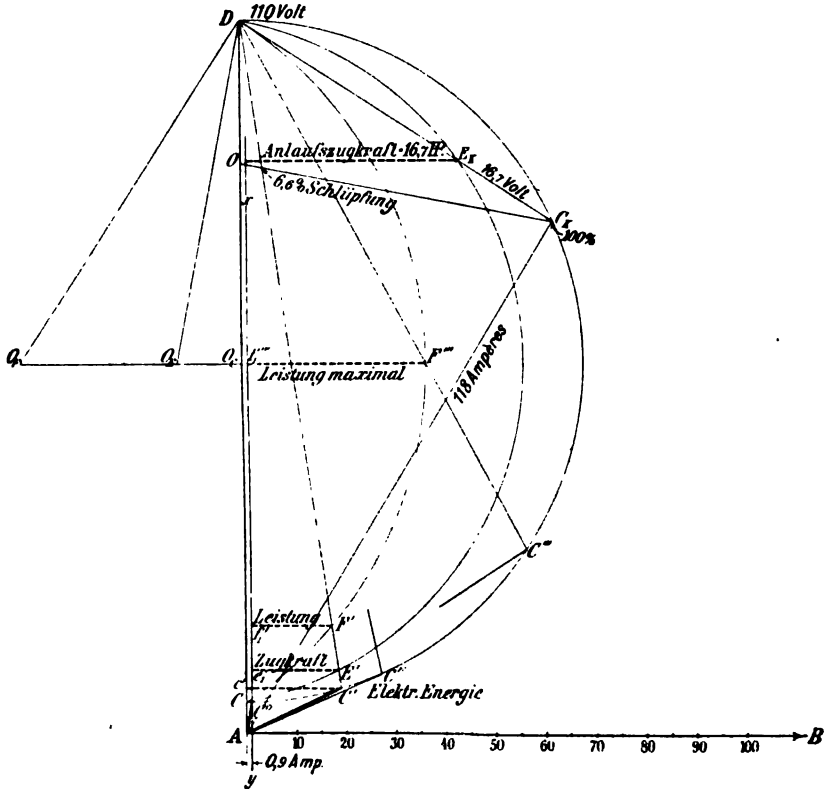
Wir finden so den Punkt C_K des Diagrammes. Der Mittelpunkt (O_E) des Kreises der verbrauchten elektrischen Energie ist jetzt durch eine zeichnerische Konstruktion leicht zu finden. Der Punkt O_F wird er-

Digitized by Google

halten, indem wir im Punkte D eine Senkrechte zu $C_K D$ errichten, welche die Normale $O_E O_F$ schneidet. Es ist also $D C_K$ eine Tangente zum Kreise der mechanischen Leistung.

Nun ist noch der dritte Kreis für die Zugkraft zu bestimmen. Dies geschieht dadurch, dass die Gerade $C_K D$ — die bekanntlich die elektrischen Verluste bei Kurzschluss darstellt — im Verhältnis der

Fig. 10.



Widerstände der beiden Anker geteilt wird. Der dritte Kreis geht dann durch diesen Punkt.

Im Diagramm entspricht das Feld pro Phase einer Spannung von 110 Volt und es entfallen auf den Verlustvektor bei Kurzschluss mit demselben Massstab gemessen.

$$C_K D \asymp \frac{110}{A D} = 57 \text{ Volt.}$$

Digitized by Google

In der Erregerwickelung, deren Widerstand pro Phase 0,142 Ohm ist, gehen bei Kurzschluss 118 Ampère verloren, was einem Spannungsabfall von

$$118 \times 0{,}142 = 16{,}8 \text{ Volt}$$

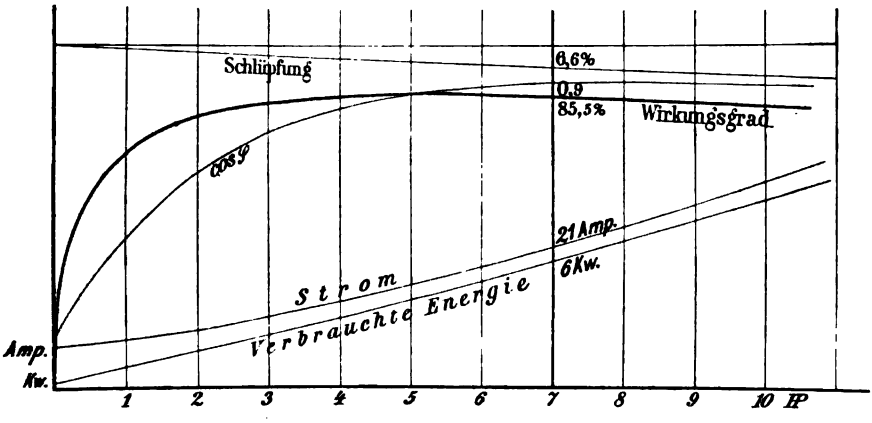
entspricht.

Um den Schnittpunkt des dritten Kreises mit $C_K D$ zu finden, müssen wir also diesen Wert im Massstab $\frac{16{,}8}{57}$ von C_K aus auf $C_K D = C_K E_K$ abtragen.

Endlich fällen wir von C_K aus ein Lot auf die Linie $O_E D$ und erhalten so die Schlüpfung für jeden beliebigen Belastungsfall. Bei

Fig. 11.

7 HP. Drehstrom-Motor, 190 Volt, 50 ∾.



Leerlauf ist die Schlüpfung sehr gering, bei normaler Belastung nur 6,4 %.

Die Fig. 11 zeigt die charakteristischen Kurven des untersuchten Motors und zwar abhängig von der geleisteten mechanischen Arbeit.

Die normale Leistung des Motors ist 7 HP., sein Wirkungsgrad ist 85,5 % und der cos $\varphi = 0{,}9$. Cos φ erreicht bei 9 HP. ein Maximum von 0,91.

Der Motor läuft mit einer Zugkraft von 16,7 HP. an und hat eine maximale Leistung von 15,4 HP.

Motor von 10 PS.

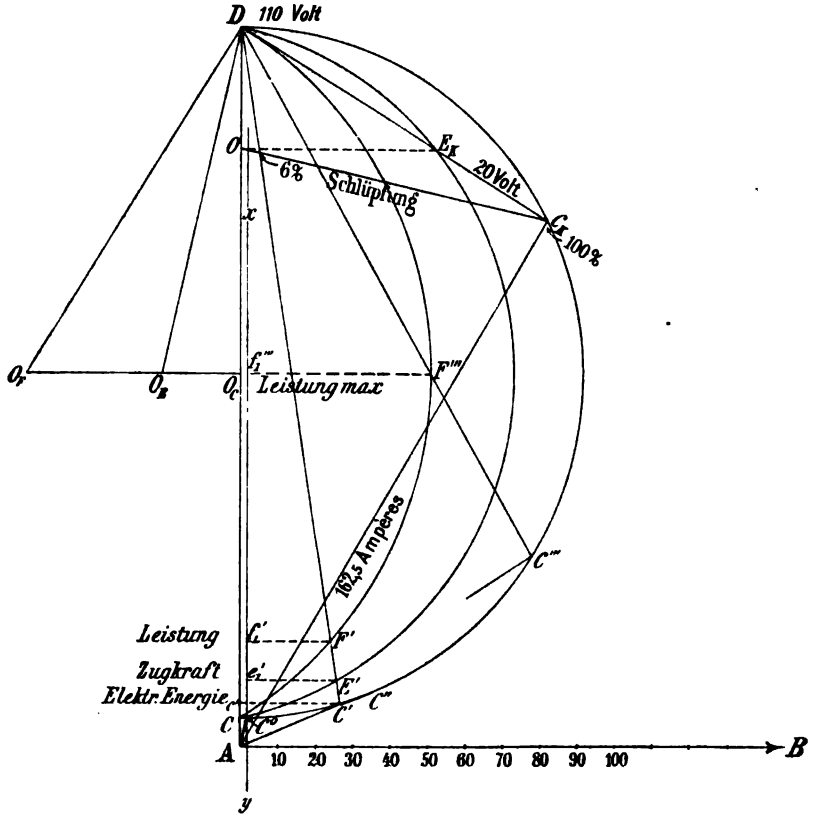
Die nachfolgenden Fig. 12 u. 13 veranschaulichen das Phasendiagramm und die charakteristischen Kurven eines 10 PS.-Motors.

Digitized by Google

Die Versuche ergaben:

1. Bei Leerlauf unter 110 Volt Phasenspannung
   J = 8 Ampère,
   a = 197 Watt.
2. Bei Kurzschluss bei 110 Volt Phasenspannung
   J = 162,5 Ampère,
   a = 9 Kilowatt.

Fig. 12.



3. Widerstand pro Phase
   r = 0,123 Ohm.

Fig. 12 ist das mit diesen Daten konstruierte Diagramm, welches leicht zu verfolgen ist.

Die charakteristischen Kurven sind in Fig. 13 dargestellt und wir wollen hier nur noch die verschiedenen Grössen bei der normalen Belastung von 10 Pferden erwähnen.

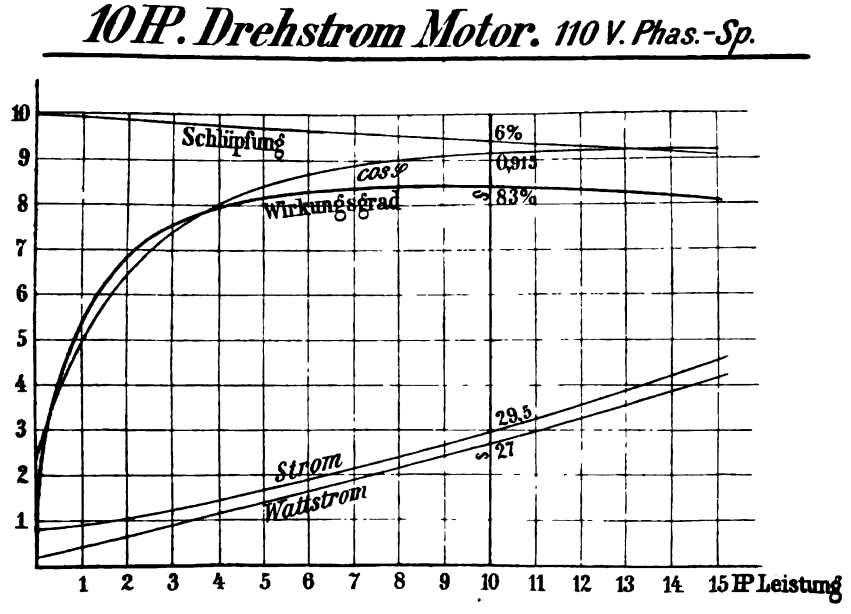
Digitized by Google

Wirkungsgrad 83 %,
Strom 29,5 Ampère,
verbrauchte Energie 2,95 Kilowatt,
cos $\varphi = 0{,}915$,
Schlüpfung 6 %,
maximale Leistung 21 PS.

Der Induktionsmotor als Generator.

Bekannt ist die Eigenschaft der Induktionsmotoren, dass sie, wenn über Synchronismus angetrieben, als Generatoren [1]) arbeiten und

Fig. 13.



Strom zurückliefern, analog wie dies bei Gleichstrom-Nebenschlussmaschinen der Fall ist. Es ist interessant, dass das Diagramm ohne weiteres auch über dieses Verhalten Aufklärung gibt, einfach indem man den links von A D gelegenen Teil des Kreises ergänzt (Fig. 14).

Die Schlüpfung wird dann negativ. Die frühere mechanische Leistung erhält dann die Bedeutung der mechanisch aufgewandten

[1]) Danielson, El World 1893, Bd. 21, p. 44.

Digitized by Google

Fig. 14.

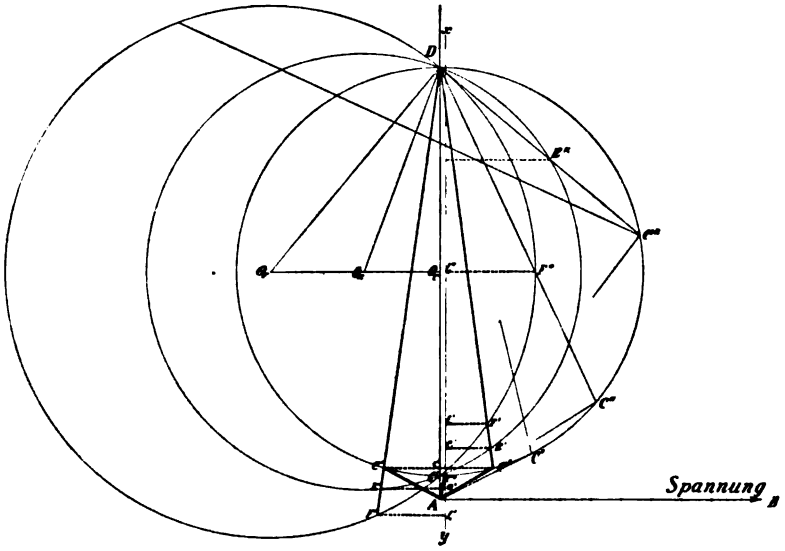
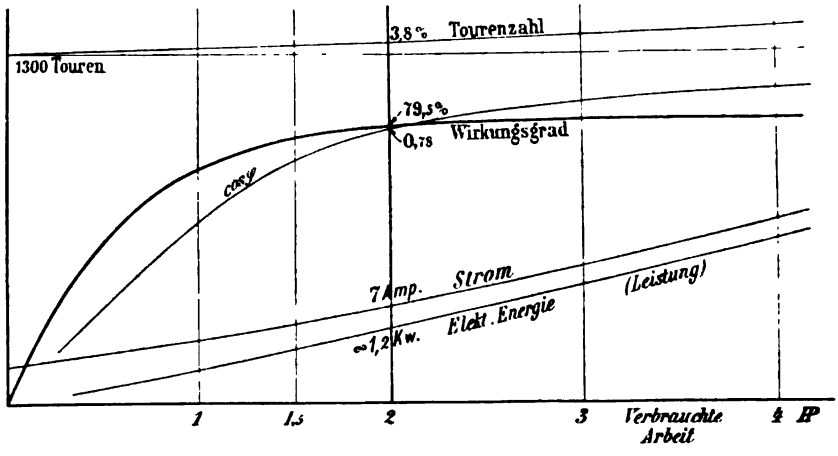


Fig. 15.

2 HP. Drehstrom Motor als Generator

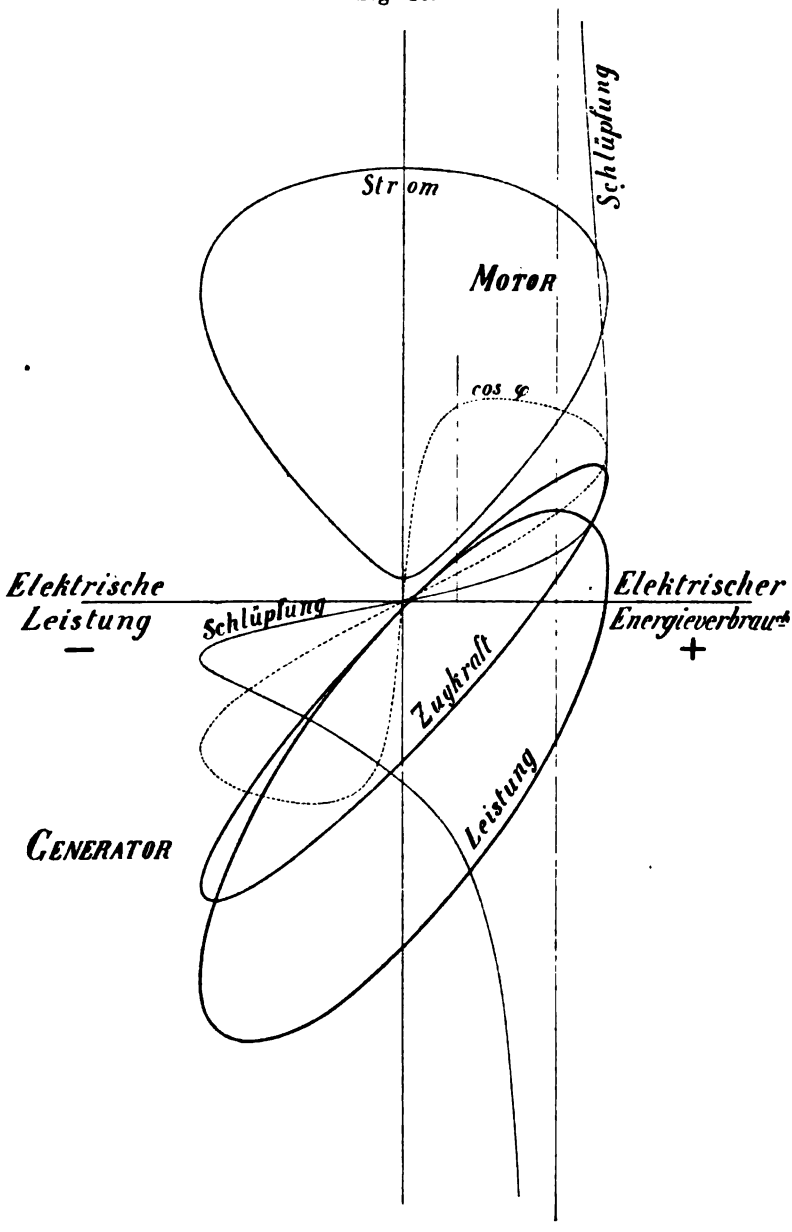


Energie, elektrischer Energieverbrauch wird elektrische Leistung (Fig. 15).

Wir sehen, der Motor liefert genau denselben Strom unter gleicher Phasenverschiebung als er als Motor verbrauchte, also genau

Digitized by Google

Fig. 16.



die dem früheren elektrischen Energieverbrauch entsprechende elektrische Energie.

Der mechanische Arbeitsverbrauch wird natürlich damit be-

Digitized by Google

deutend höher als vorher die mechanische Leistung, und zwar wie leicht ersichtlich um den doppelten Betrag der Verluste, da sich jetzt alle Verluste zu der elektrischen Leistung addieren, die sich früher von derselben subtrahierten.

Vom theoretischen Standpunkte aus besonders interessant werden die Kurven, wenn man sie nicht abhängig von der geleisteten mechanischen, sondern von der verbrauchten elektrischen Energie aufträgt, also von der Grösse, welche im Diagramme dem Wattstrome also auch den Abscissen entsprechen (Fig. 16).

Die Kurven erhalten dann alle nämlich mathematisch regelmässige Formen und sind leicht zu verfolgende kontinuierliche Kurven. Zugkraft und mechanische Leistung werden Ellipsen, cos φ eine Winkelfunktion u. s. w.

Zu untersuchen sind drei Gebiete:

1. Als Motor	(Schlüpfung 0 bis 1)		$C_0 \rightarrow C^K$
2. Als Generator	„	< 0	$C_0 \rightarrow D \rightarrow C^K$.
3. „ „	„	> 1	

Hiemit dürften alle wesentlichen Gesichtspunkte der vorliegenden Methode erschöpft sein. Alle komplizierten Einzelheiten des Motors sind im wesentlichen auf zwei Basen, magnetische Streuung und elektrische Verluste, zurückgeführt, welche einzig und allein der Wirkungsweise der Motoren in jeder Variation zu Grunde liegen. Der Variationen in diesen Grössen gibt es mannigfaltige und es bleibt jedem einzelnen überlassen, sich die ihm passenden Verhältnisse zu wählen.

Einphasenmotoren.

Die grundlegende Theorie des Mehrphasenmotors ist durch die von vornherein gegebene Einführung eines Drehfeldes ausserordentlich einfach. Etwas schwieriger liegen die Verhältnisse beim Einphasenmotor.

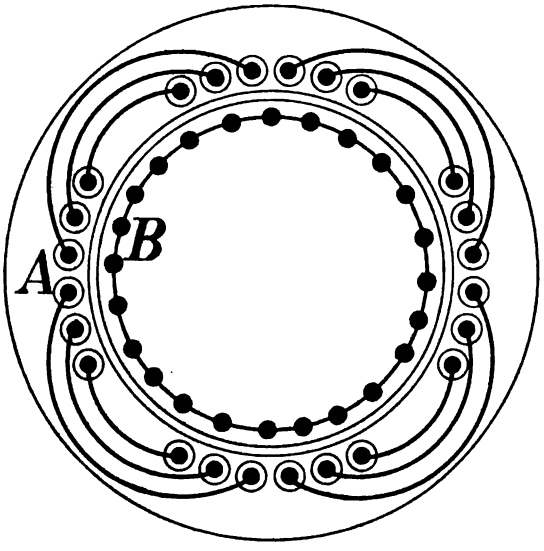
Der Einphasenmotor besitzt eine einphasige Wickelung für einfachen Wechselstrom (Fig. 17) und kann deshalb offenbar von vornherein auch nur ein einfaches Wechselfeld hervorbringen in der Achsenrichtung der Wickelung. Ein derartiges einfaches Wechselfeld ist aber natürlich nicht in der Lage, einen Kurzschlussanker ohne Kollektor oder ähnliche Vorrichtungen zur Drehung zu bringen. Es scheint daher auf den ersten Blick wohl etwas erstaunlich, dass ein derartiger Motor funktionieren und Arbeit leisten kann. Der Einphasenmotor in seiner

Digitized by Google

einfachen Gestalt mit einphasiger Wickelung läuft dann auch aus der Ruhelage nicht an, er muss vielmehr durch irgend ein Hilfsmittel erst auf eine gewisse Geschwindigkeit gebracht werden. Bei höherer Geschwindigkeit funktioniert er dann aber genau wie ein Mehrphasenmotor.

Die Erklärung für dieses Verhalten liegt darin, dass auch beim Einphasenmotor bei einer gewissen Geschwindigkeit im Kurzschlussanker ein stehendes, mit dem Anker rotierendes Feld entsteht. Zwischen diesem Felde und den Ampèrewindungen der Einphasenwickelung tritt dann in derselben Weise ein Drehmoment auf, wie zwischen dem Felde

Fig. 17.



des Kurzschlussankers und einer der zwei oder drei Phasenwickelungen des Mehrphasenmotors. Das Drehmoment ist aber durch den Fortfall einer zweiten Phase pulsierend, es hat ein Maximum, wird Null und erreicht wieder ein Maximum, je nach der Stellung zwischen Feld und Spule.

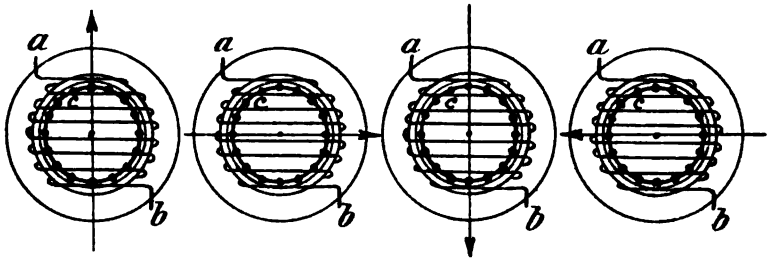
Man kann bei den Induktionsmotoren, sowohl bei den Ein- als Mehrphasenmotoren, den Kurzschlussanker als Feldmagneten auffassen, analog den Feldmagneten der Synchronmotoren. Der einzige Unterschied ist dann nur der, dass die Feldrichtung, d. h. die Achse der Felder, nicht starr mit dem Anker verbunden ist, sondern mit einer gewissen Zähigkeit von den Kurzschlusswindungen festgehalten wird

Digitized by Google

und nur langsam, der Schlüpfung entsprechend, hinter dem Kurzschlussanker rotiert.

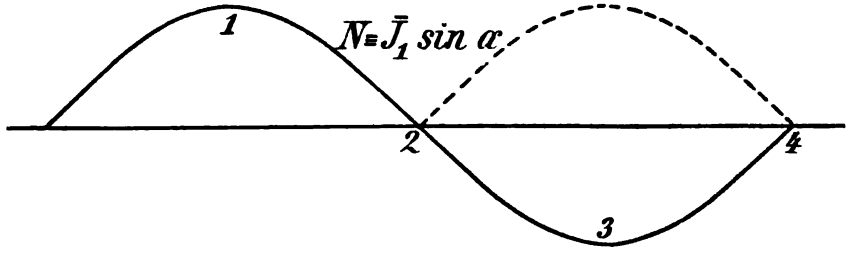
Dass auch beim Einphasenmotor wie beim Mehrphasenmotor dieses konstante Feld im Kurzschlussanker auftritt, trotzdem die Erregerwickelung nur ein einfaches Wechselfeld erzeugt, erklärt sich

Fig. 18. Fig. 19. Fig. 20. Fig. 21.



eben aus der charakteristischen Eigenschaft der Kurzschlusswindungen, dass sie ein einmal sie durchsetzendes Feld mit grosser Zähigkeit aufrecht erhalten, indem jede Aenderung dieses Feldes in den Kurzschlusswindungen Ströme hervorruft, welche eben derselben Aenderung entgegengesetzt wirken und dies mit um so grösserer Energie, je niedriger der Widerstand dieser Windungen ist und je schneller die Pulsationen des Feldes stattfinden.

Fig. 22.



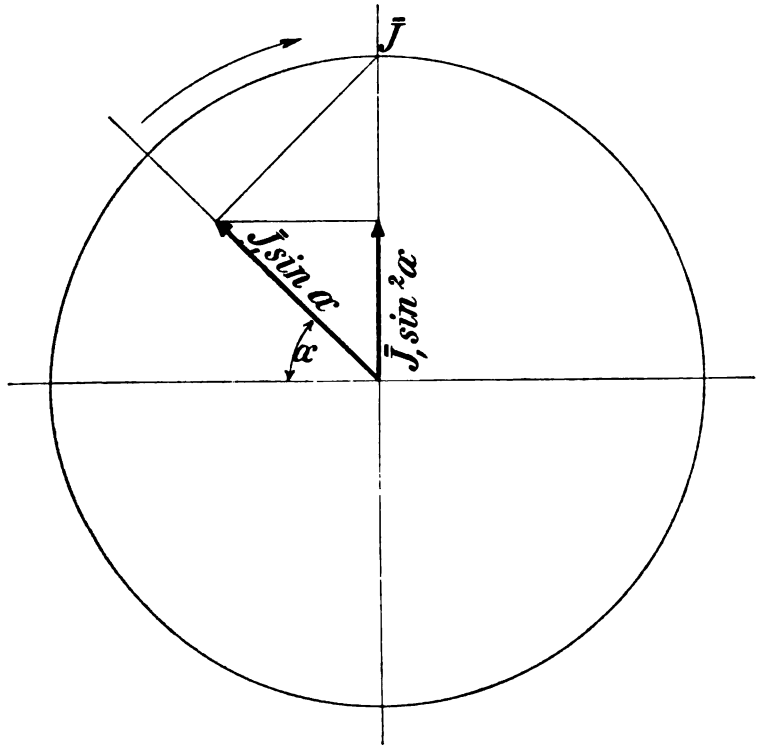
Wenn wir uns den Anker des Einphasenmotors synchron rotierend denken, so wird das primäre Wechselfeld im Anker nicht mehr als Wechselfeld auftreten, denn in derselben Zeit, in der die Feldstärke von 0 anfangend durch das positive Maximum hindurch wieder 0 erreicht, hat auch der Anker sich um 180° gedreht und das primäre

Digitized by Google

Wechselfeld wird sich also im Anker äussern als ein intermittierendes, aber gleichgerichtetes Feld.

Jede Pulsation des Ankerfeldes erzeugt aber in den Ankerwindungen wattlose Ströme, welche die Pulsationen bis auf ein praktisch zu vernachlässigendes Minimum unterdrücken, d. h. das in dem rotierenden Kurzschlussanker zunächst intermittierende Feld auf eine konstante Stärke halten. In den Stellungen, wo das dem Erregerstrom ent-

Fig. 23.



sprechende Feld diesen konstanten Wert überschreiten würde, wirken die Kurzschlussampèrewindungen entmagnetisierend, in den anderen Stellungen liefern sie den Magnetisierungsstrom.

Um uns über diese Vorgänge ein klares Bild zu machen, wollen wir die folgenden vier charakteristischen Stellungen herausgreifen.

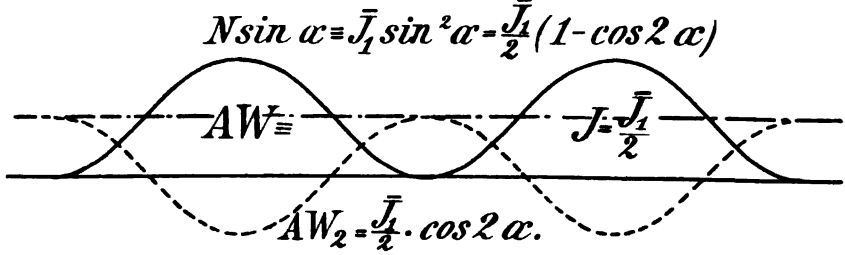
In den Fig. 18—21 sei a—b die feststehende primäre Wickelung, c der Kurzschlussanker, der synchron rotiert. Das durch den Strom J_1

Digitized by Google

erzeugte Feld würde dann den in Fig. 22 dargestellten Verlauf haben. In den Stellungen 1 und 3 wirkt die ganze Amplitude einmal in der einen und einmal in der anderen Richtung. Da der Kurzschlussanker sich aber in dieser Zeit um 180° gedreht hat, so wird das Feld im Kurzschlussanker, in den Stellungen 1 und 3 dieselbe Richtung haben und nach der punktierten Kurve verlaufen. Jetzt tritt aber die obengeschilderte Wirkung der Kurzschlusswindungen ein, das Feld kann nicht stark pulsierend sein, sondern bleibt im Anker konstant, d. h. wir erhalten ein mit dem Kurzschlussanker rotierendes, konstantes Feld.

Ueber die Vorgänge im Kurzschlussanker lässt sich jetzt folgendermassen ein Bild schaffen. Seien J_1 die magnetisierenden Ampèrewindungen des Erregerankers, J_2 diejenigen des Kurzschlussankers, so müssen beide sich offenbar zusammensetzen zu den Ampèrewindungen J, welche das konstante Feld erzeugen. Von der Wirkung

Fig. 24.



der Streuung sei hierbei zunächst noch abgesehen. Nehmen wir wieder an, dass der Wechselstrom nach einer Sinusfunktion verläuft und sei $\bar{J}_1$ der Maximalwert dieses Stromes in den Windungen des Erregerankers, wenn der Motor leerläuft, so ist der Momentanwert der Ampèrewindungen des Erregerankers bei Leerlauf proportional

$$J_1 \cdot \bar{J}_1 \sin \alpha.$$

Denken wir uns den Kurzschlussanker feststehend und den Erregeranker rotierend, so muss mit dem feststehenden Kurzschlussanker auch das konstante Feld stillstehen. Dieses Feld wird hervorgerufen durch die Ampèrewindungen des sich drehenden Erregerankers, welche sich schon selbst nach einer Sinusfunktion ändern. Das Feld des Kurzschlussankers muss daher eine Komponente haben proportional

$$J_1 \sin \alpha = \bar{J}_1 \sin^2 \alpha \equiv \bar{J}_1 \frac{1 - \cos 2\alpha}{2}.$$

Digitized by Google

Das Feld des Kurzschlussankers muss aber konstant sein und damit die resultierenden Ampèrewindungen proportional $\overline{J}$, wenn $\overline{J}$ der Magnetisierungsstrom ist. Die Differenz der magnetisierenden Ampèrewindungen und die des Erregerankers muss daher im Kurzschlussanker erzeugt werden und wir haben daher, wenn $\overline{J}_2$ die Amplitude des Stromes im Kurzschlussanker ist,

$$\overline{J}_2 = \overline{J} - \frac{\overline{J}_1}{2}(1 - \cos 2\alpha),$$

$$\overline{J}_2 = \overline{J} - \frac{\overline{J}_1}{2} + \frac{\overline{J}_1}{2}\cos 2\alpha.$$

Die Ströme im Kurzschlussanker können nur eine periodische Funktion der Zeit sein, d. h. jede Konstante muss fortfallen. Es ist daher

$$\overline{J} - \frac{\overline{J}_1}{2} = 0,$$

$$\overline{J} = \frac{\overline{J}_1}{2},$$

$$\overline{J}_2 = \frac{\overline{J}_1}{2}\cos 2\alpha.$$

Es sind also die Ampèrewindungen des Erregerankers:

$$AW_1 \equiv \frac{\overline{J}_1}{2} - \frac{\overline{J}_1}{2}\cos 2\alpha,$$

und die des Kurzschlussankers:

$$AW_2 \equiv \frac{\overline{J}_1}{2}\cos 2\alpha,$$

und die magnetisierenden Ampèrewindungen:

$$AW \equiv \frac{\overline{J}_1}{2} \equiv \overline{J},$$

d. h. bei Einphasenmotoren ist der Magnetisierungsstrom J gleich dem halben Leerstrom. Die vier charakteristischen Stellungen geben jetzt folgendes Bild:

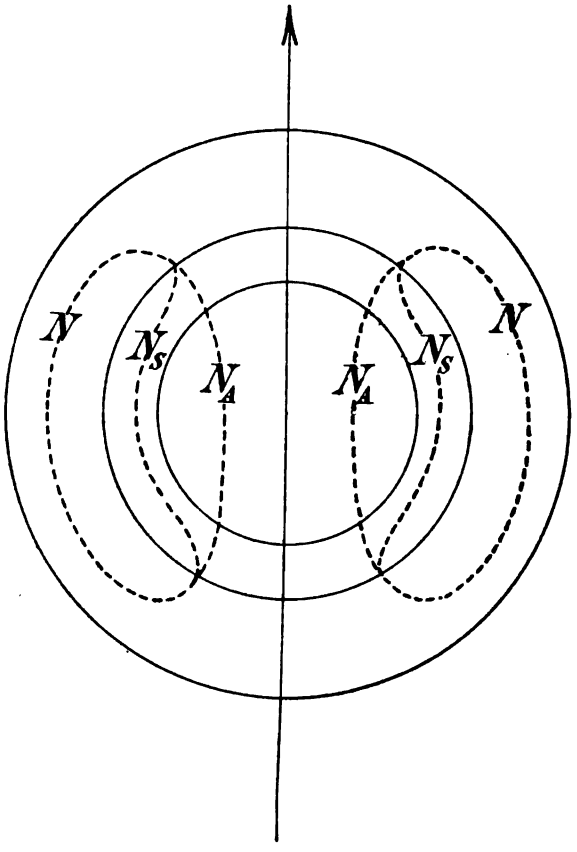
Digitized by Google

Die Summe der beiden Felder bildet eine Gerade entsprechend der Amplitude $\frac{\overline{J}_1}{2}$.

Die einzelnen Felder werden durch die beiden Wellenlinien dargestellt (siehe Fig. 24).

Genau konstant ist jedoch dieses Drehfeld nicht, sondern eine

Fig. 25.



leichte Wellenlinie. Eine einfache Ueberlegung zeigt aber, dass man diese Pulsationen vernachlässigen kann.

Ein normaler Motor verbraucht bei Vollbelastung etwa den 5fachen Magnetisierungsstrom. Sei die Schlüpfung 4 %, so wird dieser Strom hervorgerufen durch 4 % der vollen Wechselzahl. Im vorliegenden Fall haben wir aber, wie im Anfang erläutert, die doppelte

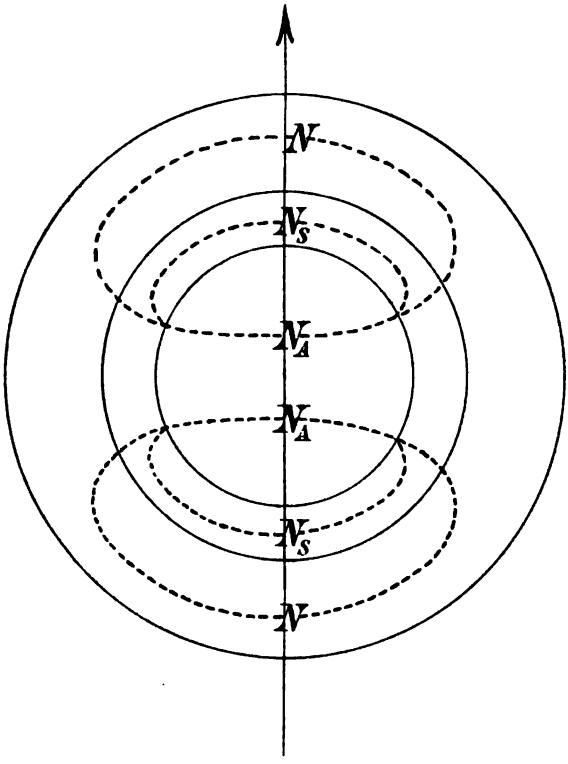
Digitized by Google

Wechselzahl, also 200 %. Die Pulsation, welche den Magnetisierungsstrom erzeugt, wird daher nur

$$\frac{4 \times 5}{200} = {}^1/_{100}$$

des konstanten Feldes sein oder 1 %. Eine andere Vernachlässigung,

Fig. 26.



die wir jedoch hier wieder richtig stellen wollen, ist der Einfluss der Streuung, welche bewirkt, dass das Verhältnis zwischen

$$\frac{\text{Leerstrom}}{\text{Magnetisierungsstrom}}$$

nicht gleich zwei ist.

In den beiden Stellungen der Fig. 25 und 26 soll das Ankerfeld genau gleich sein. In der einen Stellung, Fig. 25, wird es erzeugt von der Primärwickelung durch den Magnetisierungsstrom

$$J = J_1 - J_2$$

Digitized by Google

und es ist unter Berücksichtigung des magnetischen Widerstandes das Ankerfeld

$$N_a = \frac{J}{\rho}.$$

In der anderen Stellung, Fig. 26, wird das Ankerfeld erzeugt durch die Ampèrewindungen des Kurzschlussankers. Der magnetische Widerstand wird dadurch kleiner, da das Feld ausser den Weg des Hauptfeldes auch noch den Weg des Streufeldes nehmen kann. Nennen wir den magnetischen Widerstand in diesem Falle ρ', so ist

$$N_a = \frac{J_2}{\rho'}.$$

Wir haben gesehen, dass das Ankerfeld nahezu konstant bleibt und wir haben also

$$\frac{J}{\rho} = \frac{J_2}{\rho'}$$

oder da

$$J_2 = J_1 - J,$$

$$\frac{J}{\rho'} + \frac{J}{\rho} = \frac{J_1}{\rho'},$$

$$J(\rho + \rho') = J_1 \rho,$$

$$\frac{J_1}{J} = \frac{\rho + \rho'}{\rho} = \frac{\text{Leerstrom}}{\text{Magnetisierungsstrom}}.$$

Durch Einsetzung der Einzelwiderstände ρ_1, ρ_2 und ρ_2 kann das Verhältnis in einer anderen Form erscheinen, in der nur bekannte Grössen vorkommen. Es zeigt sich, dass ρ' wenig von ρ verschieden ist und also das Verhältnis nahezu zwei ist. Der Vorgang ist daher folgender:

Im leerlaufenden Einphasenmotor bildet sich im Kurzschlussanker genau wie beim Drehstrommotor ein stehendes, mit dem Kurzschlussanker rotierendes Feld. Dieses Feld wird, wenn es mit der Achse der Erregerwickelung zusammenfällt, direkt von dieser Wickelung erzeugt. In der hierzu senkrechten Richtung wird es erzeugt von dem Leerstrome des Kurzschlussankers. Dieselben sind wattlos und werden vom Erregeranker aus induziert, was sich dadurch äussert, dass der Leerstrom auf den doppelten, genau auf den $\frac{\rho + \rho'}{\rho}$fachen Betrag des Magnetisierungsstroms wächst.

Digitized by Google

Ob dieses Feld in seiner Lage senkrecht zur Erregerwickelung von dem Kurzschlussanker oder durch eine zweite Phasenwickelung (wie beim Zweiphasenmotor) erzeugt wird, ist offenbar für die Erregerwickelung gleichgültig, und die einphasige Erregerwickelung übt auf den Kurzschlussanker dasselbe Drehmoment aus, wie z. B. eine Phase eines Zweiphasenmotors.

Durch diese Ueberlegungen erhalten wir aus dem Mehrphasenmotorendiagramm das Einphasenmotorendiagramm. Beim Mehrphasenmotor war

$$AC \equiv J = \text{Magnetisierungsstrom.}$$

Beim Einphasenmotor ist

$$AC = J_1,$$

$$AC = J \cdot \frac{\rho + \rho'}{\rho}$$

oder, da ρ wenig von ρ' verschieden ist,

$$AC = 2J.$$

Das Verhältnis $\frac{AD}{AC}$ ist daher nicht mehr

$$\frac{AD}{AC} = \frac{\rho_s}{\rho}$$

wie beim Mehrphasenmotor, sondern

$$\frac{AD}{AC} = \frac{\rho_s}{2\rho},$$

d. h. gleich dem Verhältnis für einen Mehrphasenmotor mit doppeltem magnetischen Widerstand.

Durch diese Betrachtungen darf man sich nun in die Parallele zwischen Mehr- und Einphasenmotoren nicht zu weit führen lassen. Man darf z. B. nicht annehmen, dass man einen guten Einphasenmotor erhalten würde, wenn man einfach einen Mehrphasenmotor als Einphasenmotor laufen lässt, indem man z. B. eine der Phasen ausschaltet. Ein solcher Einphasenmotor würde nur schlechte Resultate geben und wegen des Ausfalles der zweiten Phase nicht viel mehr als die Hälfte des gleich grossen Mehrphasenmotors leisten. So ungünstig liegen die Verhältnisse jedoch nicht; es treten vielmehr bei der Konstruktion eines Einphasenmotors ganz andere Gesichtspunkte auf, wodurch verschiedene Grössen sich ausserordentlich reduzieren lassen, deren Folge ist, dass ein guter Einphasenmotor nur wenig

Digitized by Google

grösser ausfällt als ein Mehrphasenmotor gleicher Leistung und auch der Wirkungsgrad nur wenig zurückbleibt.

Eine Behandlung dieses Gegenstandes fällt jedoch ausserhalb des Rahmens dieser Veröffentlichung, und ich behalte mir vor, darauf an anderer Stelle ausführlicher zurückzukommen.

Meine heutige Aufgabe war es, das von mir entworfene Diagramm in einer klaren, leicht fasslichen Form in den Dienst der Praxis zu stellen, und sollte es mir gelungen sein, hiermit zur Klärung des kompliziertesten Teiles unserer Wechselstromtheorie beigetragen zu haben, so ist das Ziel der vorliegenden Abhandlung erreicht.

Digitized by Google

Die Wechsel- und Drehstromgeneratoren.

Von

Oberingenieur Dr. **F. Niethammer.**

Mit 29 Abbildungen.

Einteilung. Wechselspannungen werden technisch dadurch erzeugt, dass man

1ª. eine Drahtschleife gegenüber einem konstanten Magnetfeld oder

1ᵇ. ein konstantes Magnetfeld gegenüber einer Drahtschleife bewegt, oder dadurch, dass man

2. die magnetische Permeabilität in der Nähe der Schleife periodisch ändert, oder dadurch, dass man

3. die Schleife durch ein wechselndes Magnetfeld induzieren lässt.

Praktisch gibt das in der Regel folgende Ausführungsformen:

1ª. Aussenpolmaschine, Wechselpoltype,

1ᵇ. Innenpolmaschine, Wechselpoltype; ausnahmsweise Aussenpolmaschine mit rotierenden Polen (Brown, Boveri & Co.),

2. Innenpolmaschine, Gleichpoltype (Induktortype),

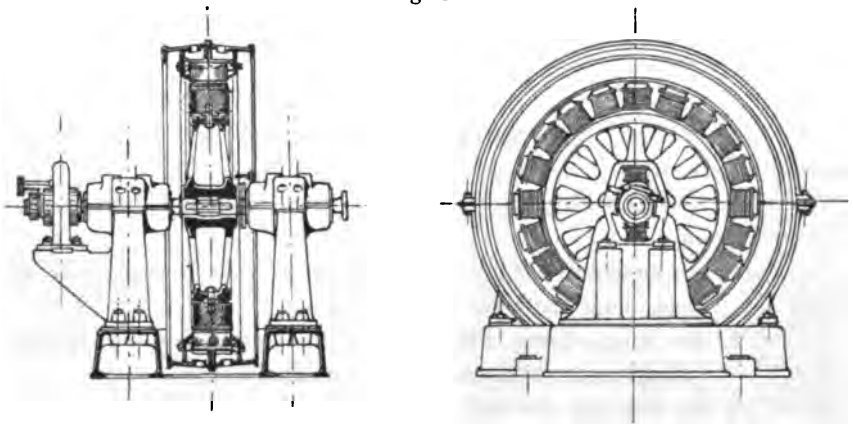
3. Asynchroner Induktionsgenerator.

Die induzierte Wickelung wird als Trommel, Ring, Scheibe oder als Pol- bezw. Zackenanker angeordnet. Bei Trommelwickelung ist nicht die schleichende Gleichstromwickelung, sondern der Spulenanker (Fig. 6) das Uebliche; die Spulen liegen in Löchern oder Nuten des Ankereisens. Die Ringwickelung kann als gewöhnlicher Grammering mit Innen- oder Aussenpolen oder als Flachring mit zwei seitlichen Magnetkränzen ausgeführt werden, von denen jeder lauter gleichnamige

Digitized by Google

oder abwechselnd verschiedene Pole besitzen kann. Während bei der Wechselpoltype das induzierende Magnetfeld seine Stärke von einem positiven Maximum durch Null bis zu einem negativen Maximum und wieder zurück ändert, schwankt bei der Gleichpoltype, wozu streng genommen auch Flachring- und Scheibenmaschinen mit Magnetkränzen gleicher Polarität zu zählen sind, der Kraftlinienfluss nur zwischen einem Maximum und einem gleichgerichteten Minimum. Die Wechselpoltype 1^a besitzt in der Regel eine feststehende Erregerwickelung und rotierende Wechselstromspulen, denen der Strom durch Schleifringe entnommen wird, die Type 1^b dagegen meist ein rotierendes Magnetgestell, dem der erregende Gleichstrom durch zwei Schleifringe zugeführt wird (Fig. 1 von Kolben & Co). Bei der Gleichpolinduktor-

Fig. 1.



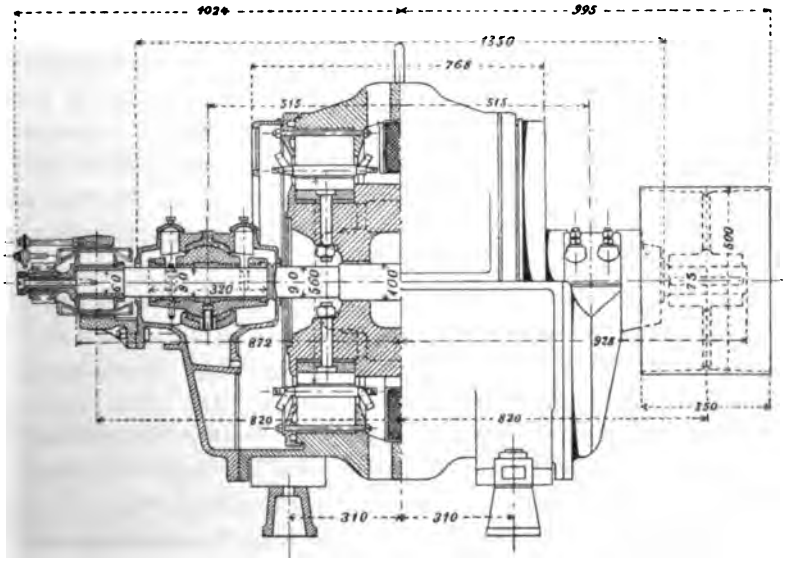
maschine (2) liegen induzierte und induzierende Wickelung fest, sie eignet sich deshalb wie die Type 1^b besser für die Erzeugung hoher Spannungen als Type 1^a. Die induzierte und induzierende Wickelung der Gleichpolinduktortype liegen entweder mit gemeinsamer Achse ineinander, oder ihre Achsen verlaufen parallel und getrennt oder senkrecht zu einander (Fig. 2 von Kolben & Co.). Der asynchrone Induktionsgenerator zeigt denselben Aufbau wie der übliche asynchrone Induktionsmotor, er benötigt an und für sich keine Gleichstromerregung. Während die früheren Wechselstrommaschinen im wesentlichen mit Scheibenankern ohne Eisen gebaut wurden, hat sich neuerdings die Wechselstrommaschine mit Eisen, und zwar mit Nuten- oder Lochanker und Trommelwickelung (Spulenanker), fast ausschliesslich eingebürgert.

Digitized by Google

Die Erregung geschah wohl früher durch permanente Magnete, heutzutage ist nur Sondererregung durch Elektromagnete unter Verwendung von besonderen Gleichstromerregermaschinen üblich, ausnahmsweise wird wohl ein Teil des Wechselstroms zur Compoundierung in Gleichstrom kommutiert. Das Magnetgestell trägt entweder auf jedem Pole eine Erregerspule (Fig. 1) oder nur auf jedem anderen, oder es ist für alle Pole eine gemeinsame grosse Erregerspule (Fig. 2) vorgesehen. Letztere Gruppierung ist besonders für die Induktortype verbreitet.

Je nachdem einer Maschine nur ein Wechselstrom oder mehrere

Fig. 2.



in der Phase verschobene Wechselströme entnommen werden, spricht man von Einphasen- und Mehrphasengeneratoren. Eine p′-phasige Maschine von 2 p-Polen trägt p′ Wickelungen, die um $\frac{360}{p' . p}$ Grad auf dem Umfang gegeneinander versetzt sind.

Vor der Erfindung der Mehrphasenströme war an eine ausgedehnte Verbreitung der Wechselstrommaschinen nicht zu denken, da einphasige Wechselstrommotoren wenigstens bis vor kurzem etwas absolut Unbefriedigendes waren. Gewisse Nachteile haften dem Wechselstrom, ob ein- oder mehrphasig, gegenüber Gleichstrom immer noch an:

Digitized by Google

1. Kapazität und Selbstinduktion veranlassen in Stromerzeugern und -verbrauchern, sowie in den Leitungen beträchtliche induktive Spannungsabfälle.

2. Bei starken Leitungen tritt die sogenannte Oberflächenwirkung auf und vergrössert den Widerstand.

3. Der Wechselstromlichtbogen ist unwirtschaftlicher als der Gleichstrombogen.

4. Chemische Wirkungen können durch Wechselströme nicht erzeugt werden; letztere lassen sich also nicht in Accumulatoren aufspeichern.

5. Wechselströme beeinflussen Telegraphen- und Telephonleitungen besonders stark.

6. Die Wechselstrommotoren haben in der Regel einen Leistungsfaktor cos φ, der um 5 bis 20 % kleiner ist als die Einheit; sie eignen sich auch verhältnismässig schlecht zur rationellen Tourenregulierung.

7. Das Parallelschalten verlangt bei Wechselstromgeneratoren mehr Aufmerksamkeit als bei Gleichstrom, wenn man von Induktionsgeneratoren absieht. Eine Hintereinanderschaltung, die für Mehrleiteranlagen zweckmässig wäre, ist ohne zwangsläufige Kuppelung ausgeschlossen.

Der Hauptvorteil des Wechselstroms liegt in der Möglichkeit, hohe Spannungen zu erzeugen und zwar von 15000 bis 20000 Volt (Paderno) in den Generatoren selbst und von Spannungen bis 100000 Volt durch ruhende Transformatoren. Die mehr und mehr aufblühende Kraftübertragung verdankt ihre Existenz im wesentlichen dem hochgespannten Drehstrom. Der Aufbau von Wechselstromgeneratoren und -motoren ist mechanisch viel einfacher als bei Gleichstrom, besonders kommt der zu Funkenbildung Veranlassung gebende Kommutator in Wegfall. Das Leitungsmaterial ist für Drehstromanlagen in der Regel auch bei gleicher Spannung etwas billiger als für Gleichstromnetze.

Ist K die Hälfte der auftretenden Gesamtkraftlinienänderung pro Pol, gleichgiltig ob es sich um einen wechselnden oder undulierenden Kraftlinienfluss handelt, so ist die effektive elektromotorische Kraft E einer Wechselstrommaschine pro Phase

$$\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T e^2 dt} = E = c \,.\, nZK \,.\, 10^{-8} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

sofern n die sekundliche Periodenzahl, Z die Leiterzahl pro Phase und e der zeitlich veränderliche Wert der elektromotorischen Kraft ist. Es

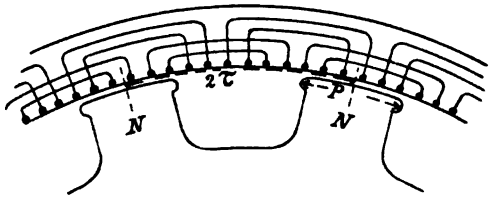
Digitized by Google

ist $n = \frac{1}{T} = \frac{u}{60} p$ (u minutliche Umlaufszahl, p Polpaarzahl). Ist der periodische Verlauf der elektromotorischen Kraft e sinusförmig, so ist $c = \frac{\pi}{\sqrt{2}} = 2{,}22$; bei Abweichung von der Sinusform ist

$$c = 2 \frac{\sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} e^2 dt}}{\frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} e\, dt} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

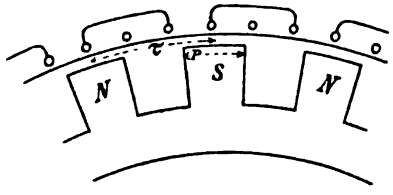
Der Faktor c hängt von der Polform und der Wickelungsanordnung ab. Unter der Annahme, dass die Felddichte am Polrand konstant ist und unter Vernachlässigung der sogenannten nützlichen Streuung

Fig. 3.



in dem Raum zwischen den Polkanten nach dem Anker, erhält man für die praktisch wichtigsten Fälle nach G. Kapp folgende Werte, wobei P : τ das Verhältnis Polbreite zu Polteilung bedeutet und nur

Fig. 4.



Nutenanker mit langen Spulen (Fig. 3[1]) dreiphasig, Gleichpoltype mit zwei Nuten pro Pol und Phase, und Fig. 4 einphasig, Wechselpoltype mit zwei Nuten pro Pol) berücksichtigt sind.

[1]) Nach G. Kapp.

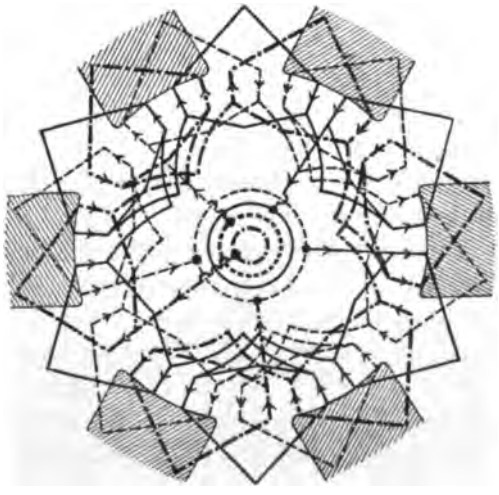
Digitized by Google

	$\frac{P}{\tau}$	Dreiphasig Nuten pro Pol und Phase				Einphasig Nuten pro Pol			
		1	2	3	∞	2	4	6	∞
Wechselpole	0,5	2,82	2,59	2,54	2,50	2,50	2,32	2,06	1,64
	0,6	2,60	2,40	2,37	2,34	2,34	2,20	1,98	1,55
	0,7	2,40	2,25	2,22	2,19	2,19	2,10	1,92	1,46
Gleichpole	0,8	2,23	2,12	2,09	1,96	1,96	1,82	1,66	1,30
	0,9	2,10	1,97	1,95	1,86	1,86	1,73	1,57	1,23
	1,0	2,00	1,82	1,80	1,76	1,76	1,64	1,49	1,16

Die Koëffizienten sind etwas zu gross (bis 10 %), da sie scharf abgegrenzte Felder voraussetzen, während dieselben thatsächlich allmähliche Uebergänge zeigen.

In Fig. 5 ist ein Schema einer sechspoligen Drehstromwickelung (dreiphasig) mit zwei Nuten pro Pol und Phase gezeichnet, in Fig. 6

Fig. 5.



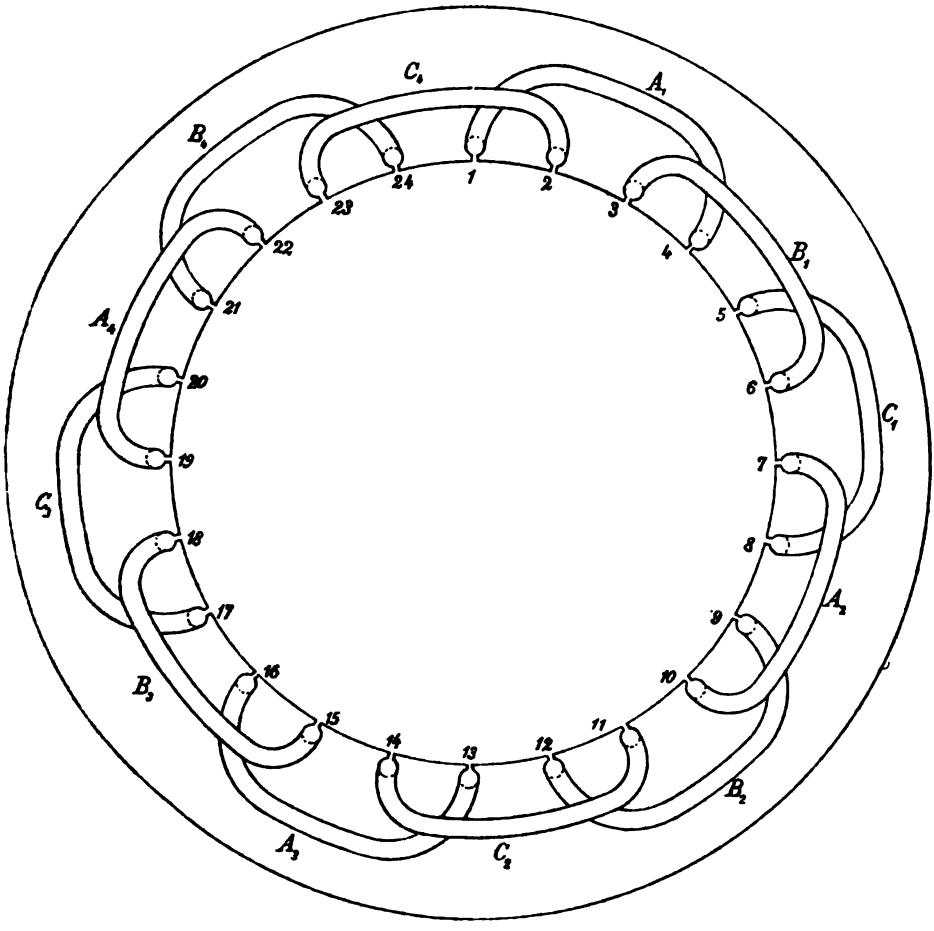
ein solches einer achtpoligen Dreiphasenwickelung mit einer Nute pro Pol und Phase, die Spulen der ersten Phase heissen $A_1 \ldots$, die der zweiten $B_1 \ldots$, die der dritten $C_1 \ldots$

Die Kurvenform der elektromotorischen Kraft weicht für die üblichen Generatoren häufig erheblich von der Sinusform ab. Die alten Scheibenanker, z. B. die alten Siemensschen Wechselstrommaschinen,

Digitized by Google

lieferten sehr sinusähnliche Kurven. Nutenanker mit vielen Nuten pro Pol und grosser Polbreite bezw. mit abgeschrägten Polschuhen, welche ein allmählich abfallendes Feld bedingen, geben am ehesten sinusförmige Spannungskurven, während Einphasenmaschinen mit nur einer Nute pro Pol ausser der Grundschwingung ein ausgesprochenes drittes har-

Fig. 6.



monisches Glied und Dreiphasengeneratoren mit einer Nute pro Pol und Phase ausgesprochene fünfte und siebente harmonische Glieder aufweisen. Steinmetz gibt an, dass bei b Nuten pro Pol der Kraftlinienverlauf darzustellen ist durch

$$K_t = K \cos \omega t \{1 + \varepsilon \cos [2 b \omega t - \varphi]\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Digitized by Google

und damit die elektromotorische Kraft durch

$$e = \frac{Z}{2}\,\frac{dK_t}{dt} = c'nZK\left\{\sin\omega t + \varepsilon\,\frac{2b-1}{2}\sin[(2b-1)\omega t - \varphi]\right.$$
$$\left. + \varepsilon\,\frac{2b+1}{2}\sin[(2b+1)\omega t - \varphi]\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

worin $\omega = 2\pi n$; ε, c' und φ gewisse Maschinenkonstanten sind. Für $b = 1$ ergibt sich für e das oben genannte dritte harmonische Glied $\sin 3\omega t$ und für $b = 3$ das erwähnte fünfte und siebente Glied $\sin 5\omega t$ und $\sin 7\omega t$.

Die Form der Spannungskurve hängt nicht allein von dem Verhältnis $P : \tau$ bezw. dem Luftfelde und dessen Verteilung und der Anordnung der Wickelung ab, sondern auch von der Grösse und Art der

Fig. 7.

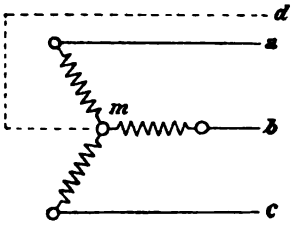
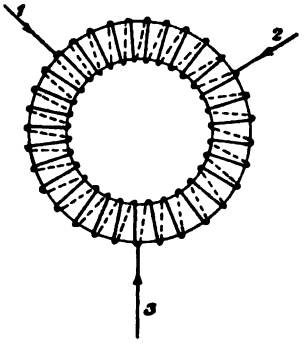


Fig. 8.



Belastung und zwar verzerrt eine nicht induktive Belastung die Kurve mehr als eine induktive. Ob eine Maschine im Anker Eisen besitzt oder nicht, beeinflusst die Kurve ebenfalls; ist wie gewöhnlich Eisen im Anker, so ist die magnetische Sättigung und die Grösse der Hysteresis von Einfluss. Einen typischen Fall für eine Kurvenverzerrung stellt die Belastung durch den elektrischen Lichtbogen dar. Die Spannungskurve zeigt dabei in der Regel zwei Spitzen und dazwischen eine Einsenkung.

Beim Bau der Wechselstrommaschinen ist es empfehlenswert, sinusähnliche Kurven anzustreben. Alle höheren harmonischen Glieder können beim Arbeiten auf Kabelnetze zu Resonanz- und Konsonanzerscheinungen und damit zu Betriebsstörungen Veranlassung geben. Spitze Kurven bedingen um ca. 10 % geringere Eisenverluste und kleineren Magnetisierungsstrom in Motoren und Transformatoren als

Digitized by Google

sinusförmige, aber der Spannungsabfall ist grösser und die Isolation wird mehr gefährdet. Flache Kurven sind für den Lichtbogen und für Gleichrichter am günstigsten.

Eine Zweiphasenmaschine erzeugt zwei Spannungen $E_{max} \sin \omega t$ und $E_{max} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$, eine Dreiphasenmaschine, die in Stern (Fig. 7) oder in Dreieck (Fig. 8) geschaltet sein kann, drei Phasenspannungen, $E_{max} \sin \omega t$, $E_{max} \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$ und $E_{max} \sin \left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right)$; bei p' Phasen handelt es sich um p' Phasenspannungen $E_{max} \sin \omega t$, $E_{max} \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{p'}\right) \ldots$, und $E_{max} \sin \left[\omega t + \frac{2\pi (p'-1)}{p'}\right]$. Bei Zweiphasenmaschinen ist die Spannung zwischen einer Klemme der einen Phase und einer der anderen Phase $\sqrt{2}\, E_{max} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)$ und bei sternverketteten Dreiphasenmaschinen diejenige zwischen zwei Leitungen $\sqrt{3}\, E_{max} \sin \left(\omega t \pm \frac{\pi}{6}\right)$. Das von Steinmetz angegebene monocyklische System (Fig. 20) besteht aus zwei um 90° verschobenen Wickelungen, deren Windungszahlen sich häufig wie $1 : \frac{\sqrt{3}}{2}$ verhalten, so dass an den drei Klemmen richtiger Drehstrom abgenommen werden kann. Das Wickelungssystem mit der kleineren Windungszahl (Hilfswickelung) ist an die Mitte der Hauptwickelung angeschlossen; an letzterer liegt die hauptsächliche Belastung, die einphasig ist (Beleuchtung).

Verbindet man p' um $\frac{1}{p'p}$ des Umfangs versetzte Punkte einer geschlossenen Gleichstromwickelung von p Polpaaren mit Schleifringen, so können denselben Mehrphasenspannungen entnommen werden. Die Phasenspannung zwischen zwei Schleifringen ist in Abhängigkeit der Gleichspannung E_g:

$$E_{p'} = \frac{c}{p'} E_g \quad \ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

wenn c der Spannungskoëffizient (Gleichung 1) ist. Setzt man räumlich sinusförmige Felder und sinusförmigen zeitlichen Verlauf voraus, so findet man

$$E_{p'} = \frac{\sin \frac{\pi}{p'}}{\sqrt{2}} E_g \quad \ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

Digitized by Google

Ist L der Selbstinduktionskoëffizient des gesamten Stromkreises einer Wechselstrommaschine, C die Kapazität und w der Widerstand, so tritt ein Strom i auf, der bestimmt ist durch

$$f(t) = e = L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int_0^t i\,dt + i\,w \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

woraus sich allgemein ergibt

$$i = \frac{C}{\sqrt{w^2C^2 - 4LC}}\left\{\varepsilon^{-\frac{t}{\tau_1}}\int \varepsilon^{\frac{t}{\tau_1}} f'(t)\,dt - \varepsilon^{-\frac{t}{\tau_2}}\int \varepsilon^{\frac{t}{\tau_2}} f'(t)\,dt\right\}$$

$$+ c_1\varepsilon^{-\frac{t}{\tau_1}} + c_2\varepsilon^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

wenn $\left.\begin{matrix}\tau_1\\ \tau_2\end{matrix}\right\} = \frac{2LC}{wC \mp \sqrt{w^2C^2 - 4LC}}$ und $\varepsilon = 2{,}718\ldots$

Für $e = E_{max} \sin \omega t$ ergibt sich in vereinfachter Weise unter Benützung der Effektivwerte E und J

$$J = \frac{E}{\sqrt{w^2 + \left(\frac{1}{C\omega} - L\omega\right)^2}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

und für den Phasenwinkel φ zwischen E und J

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\frac{1}{C\omega} - L\omega}{w} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

Die Leistung eines Wechselstromes ist

$$A = \frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} e\,i\,dt = \frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} a\,dt \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (11)$$

ein Ausdruck, der sich häufig genau nur durch Aufzeichnen der Kurven für e und i und deren Multiplikation findet (Fig. 9). Bei Sinusform für Strom und Spannung ist

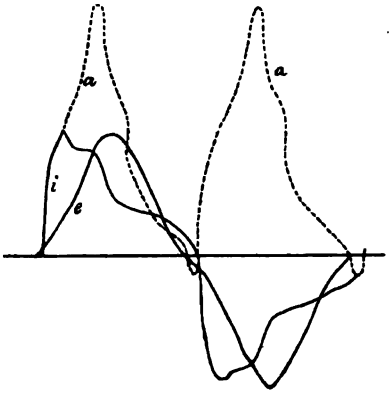
$$A = \frac{E_{max}\,J_{max}}{2}\cos\varphi = EJ\cos\varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

Die Stromkurve einer Wechselstrommaschine ist in der Regel nicht von gleicher Form wie die Spannungskurve, sie hängt von der

Digitized by Google

Art der Belastung ab. Induktive Belastung verringert in der Stromkurve die Amplituden der oberen harmonischen Glieder der Spannungskurve, während Kapazität die Höcker der Spannungskurve im Strome

Fig. 9.



verstärkt. Enthalten die Stromverbraucher Eisen, so wird besonders bei Leerlauf derselben die Stromkurve einseitig verzerrt: Fig. 10, die zur Spannungskurve Fig. 11 gehört.

Fig. 10.

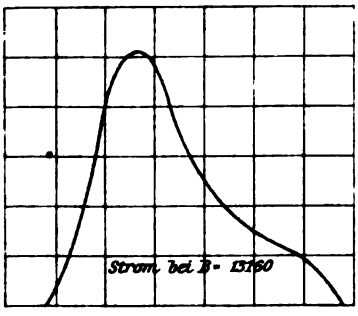
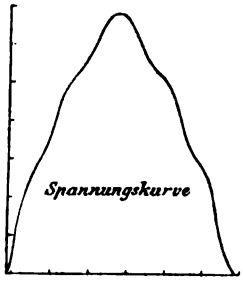


Fig. 11.



In obigen Formeln ist für w nicht der einfache Ohmsche Widerstand $w = \sigma \frac{l}{q}$ einzusetzen, sondern wegen der elektromagnetischen Schirmwirkung, der sogenannten Oberflächenwirkung (skin effect), ein grösserer Wert w_w, der um so grösser wird, je stärker der Leiter ist:

$$w_w = w\left[1 + \frac{\alpha^2}{12} - \frac{\alpha^4}{180} \pm \cdot -\right] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (13)$$

Digitized by Google

wenn $\alpha = 2\pi n \frac{\mu l}{w}$, μ die Permeabilität und l die Leiterlänge ist. Da $\frac{l}{w} = \frac{q}{\sigma}$ ist, so nimmt w_w mit $1 + c_1 q^2$ oder bei runden Drähten vom Durchmesser d mit $1 + c_2 d^4$ zu. Auch der Selbstinduktionskoëffizient L ist zu korrigieren:

$$L_w = L - \mu l \left[\frac{\alpha^2}{48} - \frac{13\,\alpha^4}{8640} \pm \ldots\right] \quad . \quad . \quad . \quad (14)$$

Der Selbstinduktionskoëffizient ist übrigens für die praktisch wichtigen Fälle eine derart variable und schwer genau definierbare Grösse, die meist Streuung und Ankerrückwirkung umfassen soll, dass zweckmässig dessen Verwendung möglichst beschränkt wird.

Bei Mehrphasenwickelungen hat man, ebenso wie man von Phasen- und Leitungsspannungen spricht, Phasenströme $J_{p'}$ und Leitungsströme J_l zu unterscheiden. Der Phasen- und Leitungsstrom einer Dreiphasenmaschine in Sternschaltung ist identisch, bei Dreieckschaltung ist $J_l = \sqrt{3}\, J_{p'}$. Verbindet man zwei Leitungen eines Zweiphasensystems verschiedener Phase, so fliesst in der gemeinsamen Leitung ein Strom $J_l = \sqrt{2}\, J_{p'}$. Für einen Gleichstromanker, dem Mehrphasenstrom entnommen wird, gilt, Gleichheit des Wechselstrom- und Gleichstromeffektes vorausgesetzt,

$$\left.\begin{aligned} J_l &= \frac{2\sqrt{2}}{p'} J_g \\ J_{p'} &= \frac{\sqrt{2}}{p' \sin \frac{\pi}{p'}} J_g \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (15)$$

wenn J_g der gesamte Gleichstrom ist.

Die Leistung einer Mehrphasenwickelung ist

$$p' J_{p'} E_{p'} \cos \varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (16)$$

Die Abgabe A_w einer mit Schleifringen versehenen Gleichstrommaschine an Wechselstromeffekt ist bei gleicher Erwärmung wie bei Erzeugung des Gleichstromeffektes A_g:

$$\left.\begin{aligned} A_w &= \frac{p'}{2\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{p'} A_g \\ \text{woraus} \quad A_w &\Big|_{p' = 2 \text{ oder } 4} = A_g \quad \text{und} \quad A_w \Big|_{p' = \infty} = 1{,}11\, A_g \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad (17)$$

Digitized by Google

Die Klemmenspannung eines Wechselstromgenerators bei Belastung ist von der elektromotorischen Kraft bei offenem Stromkreis und gleicher Erregung aus einer Reihe Gründe verschieden: 1. Erzeugt der induzierte Strom ein Gegenfeld bezw. Gegenampèrewindungen (AW), welche das äussere (primäre) Feld bezw. die es hervorrufende AW schwächen und das Feld verzerren; 2. tritt primär und sekundär ein Streufeld auf, das primäre ist zwar auch bei Leerlauf vorhanden, aber es ändert sich mit der Belastung; die Wirkung der Streuung ist identisch mit dem bis jetzt als Selbstinduktion bezeichneten Einfluss; 3. entsteht ein Spannungsabfall durch den Widerstand der induzierten Wickelung.

Ist J der Ankerstrom pro Phase (effektiv) und $z = \frac{Z}{2}$ die Windungszahl pro Phase, so wird die maximale Ampèrewindungszahl des Ankers pro Pol und Phase

$$\frac{J.z}{2p} \sqrt{2}.$$

Die zeitlich wie der Wechselstrom selbst pulsierenden Ampèrewindungen der drei Phasen einer Dreiphasenmaschine setzen sich pro Pol zu dem konstanten Betrag

$$AW_a = \frac{3}{2} \sqrt{2} \frac{J.z}{2p} = 2{,}12 \frac{J.z}{2p} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (18)$$

zusammen. Der Koëffizient $\frac{3}{2}$ $\left(\text{allgemein } \frac{p'}{2}\right)$ ist nur für bestimmte zweipolige Wickelungsanordnungen richtig, für vielpolige Maschinen schwankt er zwischen 2 und $\sqrt{3}$, also im Mittel 1,86, so dass

$$AW_a = 1{,}86 \sqrt{2} \frac{J.z}{2p} = 2{,}62 \frac{J.z}{2p} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (19)$$

Der Koëffizient wird zweckmässig für eine gegebene Maschinentype bestimmt, er sei gleich 2,12 C gesetzt.

Die Gegen-AW der Einphasenmaschine sind stets stark pulsierender Natur. Für die Berechnung wird in der Regel ein Mittelwert benützt.

$$AW_a = \frac{J.z}{2p} \sqrt{2} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot C = 0{,}9\, C \frac{J.z}{2p} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (20)$$

Kapp versucht die AW_a in Abhängigkeit des Verhältnisses $P : \tau = m$ zu bringen und schreibt

$$AW_a = \frac{Z}{4p} \frac{C'}{m} \sin m \frac{\pi}{2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (21)$$

Digitized by Google

worin für Einphasenwickelungen $C' = 0{,}57$, für Zweiphasenwickelungen $C' = 1{,}13$, für Dreiphasenanker $C' = 1{,}68$ ist; allgemein $C' = 0{,}57\ p'$. Diese Abhängigkeit von m ist aber kaum berechtigt. Kapp vernachlässigt überdies die Verzerrung durch das Ankerfeld, da er die Ankerrückwirkung proportional sin φ setzt.

Ist der Phasenwinkel des induzierten Stromes gegen die Spannung gleich Null, so ist er gegen das ihn erzeugende Feld um 90° zurückverschoben. Die Anker-AW (AW_a) sind also bei $\varphi = 0$ um 90° gegen die Feld-AW (AW_f) verschoben, bei $\varphi = +90°$ (Phasenvoreilung) sind AW_a und AW_f in gleicher Phase und gleichgerichtet, bei $\varphi = -90°$ direkt entgegengesetzt gerichtet. Verfolgt man bei $\varphi = 0$ eine mittlere Kraftlinie, die vom Feldpol austritt, so spaltet dieselbe sich in zwei Richtungen durch das Ankereisen, in der einen Richtung findet sie zunächst gleichsinnig wirkende AW_a, in der anderen entgegenwirkende, was zur Folge hat, dass sie sich krümmt und derart eintritt, dass der Weg möglichst lange durch gleichsinnig wirkende AW_a geht. Das Feld wird also verzerrt, die Kraftlinienlänge wird grösser und zwar im Pol, Anker und in der Luft; von einer rechtwinkeligen Zusammensetzung der AW_f und AW_a, von sogenannten Querwindungen ist also keine Rede, da die AW_a die Kraftlinien in gleicher Weise umschliessen wie die AW_f. Die Verlängerung des Kraftlinienweges erheischt aber eine Vergrösserung der magnetomotorischen Kraft bezw. bedingt einen Spannungsabfall. Einen Teil der zusätzlichen AW liefern allerdings die AW_a selbst. Für die Rechnung findet sich nun, da eine genaue Berechnung der Verzerrung fast unmöglich ist, für $\varphi = 0$ folgender Näherungsweg: Die verzerrte Kraftlinie lässt sich als Hypotenuse eines rechtwinkeligen Dreiecks ansehen, dessen eine Kathete die unverzerrte Kraftlinie, dessen andere die Verzerrung ist. Die Verzerrung ist proportional den AW_a, die andere Kathete den bei Leerlauf eingestellten AW_f, als Hypotenuse ergeben sich die erforderlichen resultierenden AW_r. Versuche zeigen nun, dass man im Mittel für die Kathete der Verzerrung thatsächlich die AW_a pro Pol setzen kann. Für φ zwischen 0 und 90° handelt es sich um eine Kombination von Verzerrung und Gegenwindungen, die Verzerrung wird mit grösserem φ kleiner. Die erforderlichen AW_r finden sich dann angenähert aus einem schiefwinkeligen Dreieck mit dem $\sphericalangle (\varphi + 90°)$, an dem die AW_a und AW_f als Schenkel liegen.

Zur Aufnahme der Pulsationen der Ankerrückwirkung in Einphasenmaschinen hat Leblanc die Polschuhe mit einer Kurzschlusswickelung, welche die Feldschwankungen abdämpft, versehen (Fig. 12 u. 13).

Die primäre oder Feldstreuung findet sich auf Grund des

Digitized by Google

Ohmschen Gesetzes der Magnetismen. Die Feld-AW (AW_x) für Anker und Luftspalt (auf einen Pol bezogen) treiben die Streulinien von Pol

Fig. 12.

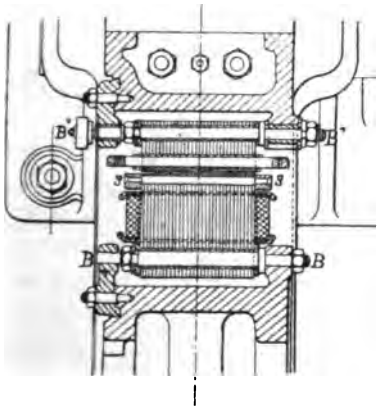
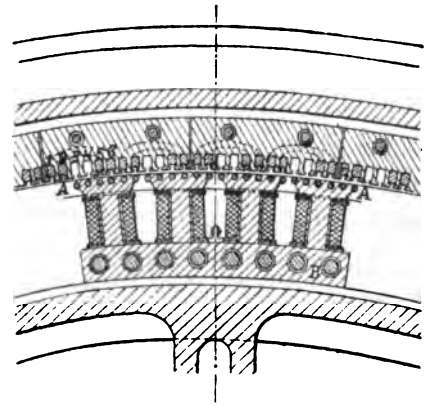


Fig. 13.



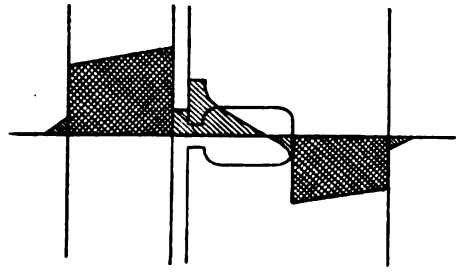
zu Pol. Ist a der mittlere Abstand zweier Pole und l h der mittlere Streuquerschnitt, so sind die Streulinien pro Pol

$$K_s' = 2{,}5\ AW_x \frac{l h}{a} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (22)$$

Bei genauer Kenntnis der Polflächen lässt sich der Streufluss noch zuverlässiger auswerten.

Ein Bild der Ankerstreuung ist durch Fig. 14 gegeben. Die AW_a schaffen um die Nute ein Feld, das doppelt schraffierte Stück

Fig. 14.



kennzeichnet das eigentliche Ankerfeld, das aber thatsächlich nicht isoliert auftritt, sondern nur kombiniert mit dem Hauptfeld; das einfach schraffierte Stück stellt das Streufeld durch die Nute, den Nutenschlitz und die Luft dar. Die Ankerstreuung wird klein, wenn möglichst

Digitized by Google

offene Nuten, die nicht tief sind, und viele Nuten pro Pol und Phase verwendet werden, auch grosse Luft wirkt vermindernd; sie ist proportional den Anker-AW (AW_a), die es hervorrufen. Für die Streulinien K_s'' pro Pol im Anker [1]) lässt sich nach dem Ohmschen Gesetz für Magnetismen schreiben:

$$K_s'' = c \frac{JZ}{p} \frac{l}{q_1} \left\{ \int \frac{F_h}{F} \frac{dh}{b} + \frac{e}{s} + \frac{\delta}{s + 1{,}6\,\delta} \right\} \quad . \quad (23)$$

worin c etwa = 3,3 ist [2]). Die Bezeichnung geht aus Fig. 15 hervor. q_1 ist die Anzahl Nuten pro Pol und Phase, Z die Leiterzahl pro Phase, l die Ankerlänge, F die ganze Nutenfläche, alle Masse in Centimeter.

Fig. 15.

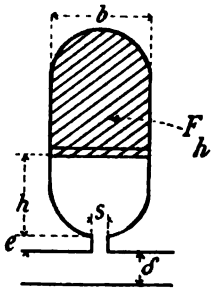
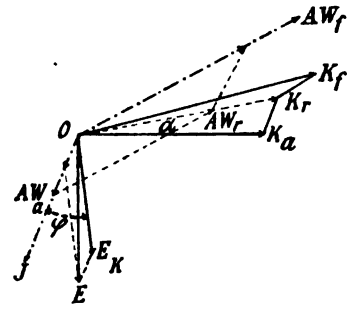


Fig. 16.



Der Zusammenhang der verschiedenen Grössen geht aus dem Vektorendiagramm Fig. 16 hervor. OK_a ist das im Anker thatsächlich auftretende resultierende Feld, d. h. das Feld, das durch die resultierenden AW erzeugt wird unter Berücksichtigung der Feldstreuung. Senkrecht dazu steht die induzierte elektromotorische Kraft E, entsprechend der Netzbelastung dagegen verschoben liegt der Strom J. Der Ohmsche Abfall J w verläuft in gleicher Richtung wie J, er setzt sich mit E zusammen und liefert die Klemmenspannung E_k. Die Anker-AW (AW_a) liegen ebenfalls auf dem Stromvektor, ihre Grösse bestimmt sich nach Gleichung 18 ff. Die Ankerstreuung K_s'' ist parallel zu AW_a und als Strecke $K_a K_r$ aufgezeichnet. Bringt man dieses Streufeld im Diagramm von K_a in Abzug, so ergibt sich das Luftfeld K_r. Nun werden die primären Streulinien K_s' nach Gleichung 22 berechnet,

[1]) Die Berechnung der elektromotorischen Kraft der Ankerselbstinduktion (-streuung) nach Kapp, die nur die Nutenzahl pro Pol und Phase berücksichtigt, kann nicht zutreffend sein, da sie den Einfluss der Nutenform, der mindestens so wichtig ist als der der Nutenzahl, ganz ausser Acht lässt.

[2]) 3,3 bei 3 Phasen, 2,2 bei 1 Phase (experimentell!).

Digitized by Google

nachdem sich die AW_x für Luft und Anker aus K_r und K_a ergeben haben. Die Ampèrewindungen AW_r, die erforderlich sind, um den gesamten Kraftlinienfluss durch den halben magnetischen Kreis pro Polpaar zu treiben, rechnen sich folgendermassen, wenn man für Pol und Schenkel zunächst die Kraftlinienzahl $K_f = K_r + K_s'$ annimmt:

$$1{,}26\,AW_r = \frac{l_a}{\mu_a}\frac{K_a}{q_a} + \frac{l_z}{\mu_z}\frac{K_a}{q_z} + l_r\frac{K_r}{q_r} + \frac{l_p}{\mu_p}\frac{K_f}{q_p} + \frac{l_j}{\mu_j}\frac{K_f}{q_j}. \quad (24)$$

l ist die magnetische Weglänge pro ½ Kreis, q der Querschnitt, μ die Permeabilität, a bezieht sich auf den Anker, z auf die Zähne, r auf die Luft, p auf den Pol, j auf das Joch. AW_r kann, da stets die Luft-AW einen beträchtlichen Posten von AW_r ausmachen, in Richtung K_r aufgetragen werden. Aus AW_a und AW_r resultieren die auf dem Feld erforderlichen AW von der Grösse AW_f. Aus AW_f und der Windungszahl pro Feldpol findet sich der Erregerstrom.

Zur näherungsweisen Berechnung der Betriebsverhältnisse eignet sich Fig. 17. Man schlägt die Ankerstreuung K_s'' einfach zu den AW_a, da die Wirkung beider doch auf eines herauskommt und sich dieselben durch Messung nur schwer trennen lassen. Diese Berücksichtigung der Ankerstreuung, die gewöhnlich gegenüber der Ankerrückwirkung AW_a gering ist, geschieht derart, dass in der Beziehung (dreiphasig)

$$AW_a = 2{,}12\,C\,\frac{Jz}{2p}. \quad (18a)$$

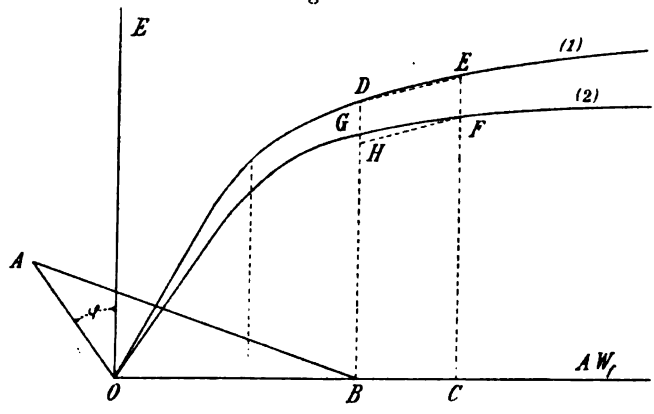
der Koëffizient C durch Messung für eine Type ermittelt wird, so dass er die Streuung einschliesst. Für die praktisch üblichen Maschinen schwankt C zwischen 0,90 und 1,40. Die Charakteristik (1) Fig. 17 zeigt die Abhängigkeit der elektromotorischen Kraft E von AW_f ohne primäre Streuung, die Kurve (2) berücksichtigt sie. Für einen bestimmten Belastungsstrom J berechnet man AW_a und trägt den Wert auf einem Strahl unter φ^0 gegen die Vertikale auf: $OA = AW_a$. Um A beschreibt man mit den eingestellten AW_f einen Kreisbogen, der die Horizontale in B trifft: $OC = AW_f$. In B und C errichtet man Lote, welche die Punkte DEFG liefern. $FH \parallel DE$. BH ist die Klemmenspannung und $CE - BH$ der Abfall bei konstanter Erregung.

Der Koëffizient C der Gleichung 18a bezw. die Grösse AW_a lässt sich experimentell aus dem Kurzschlussstrom der Maschine ermitteln, der in Fig. 18 in Abhängigkeit der Erregung aufgetragen ist. Bei kurzgeschlossener Maschine tritt ein derartiger Strom auf, dass sich, abgesehen von den geringen Kupferverlusten, die AW_a und die ein-

Digitized by Google

gestellten AW_f gerade das Gleichgewicht halten, d. h. sich gegenseitig aufheben, was ohne weiteres erklärt, dass bei gegebenem Erregerstrom der Kurzschlussstrom so gut wie unabhängig vom Luftzwischenraum und von der Tourenzahl ist. Aus Fig. 18, Kurve (2) kann man für jeden Ankerstrom auf der Abscissenachse den äquivalenten Erregerstrom entnehmen, der durch Multiplikation mit der Erregerwindungszahl die entsprechenden AW_a gibt. Der Koëffizient C ist das Verhältnis dieser AW_a zu $2{,}12\,\frac{Jz}{2p}$. Solange die Induktionen so niedrig sind, dass die elektromotorische Kraft noch auf der geraden Strecke der Charakteristik (1) Fig. 18 liegt, kann man die Klemmenspannung E_k unter Vernachlässigung des Ohmschen Abfalles aus dem Kurzschlussstrom J_k

Fig. 17.



und der elektromotorischen Kraft E (offen) für irgend einen Strom J nach Oelschläger bestimmen aus:

$$1 = \left(\frac{E_k}{E}\right)^2 + 2\left(\frac{E_k}{E}\right)\left(\frac{J}{J_k}\right)\sin\varphi + \left(\frac{J}{J_k}\right)^2 \quad . \quad . \quad (25)$$

J_k ist dabei der ideelle Kurzschlussstrom (beim Widerstand Null), der bei einer Erregung auftritt, welche bei offenem Kreis die elektromotorische Kraft E erzeugt. Der Kurzschlussstrom bei voller Erregung ist für moderne Maschinen in der Regel etwa das Dreifache des normalen Stromes J.

Aus dem Diagramm Fig. 16 geht hervor, dass der Spannungsabfall mit abnehmendem Leistungsfaktor cos φ des Netzes zunimmt, und zwar ganz erheblich. Während der induktive Abfall durch Rück-

Digitized by Google

wirkung für $\frac{J_k}{J} = 3$ bei $\cos \varphi = 1$ nur etwa 5 bis 8 % beträgt, ist er bei $\cos \varphi = 0{,}8$ schon über 25 %. Die Phasenverschiebung verringert auch die Leistung einer Maschine, da dieselbe nicht durch die Watt, sondern durch die Stromstärke bezw. die Voltampère beschränkt wird. Wechselstromgeneratoren werden deshalb nicht für KW, sondern für KW $\gtrless \cos \varphi$ verkauft. Die absorbierten PS sind allerdings auch nur PS $\gtrless \cos \varphi$. Zur Verminderung der Phasenverschiebung gibt es verschiedene Mittel:

1. Verwendung von Kapazität im Netz; dauerhafte Kondensatoren sind aber sehr teuer und schwer zu erhalten; ein Kabelnetz ist stets eine gewisse Kompensation.

Fig. 18.

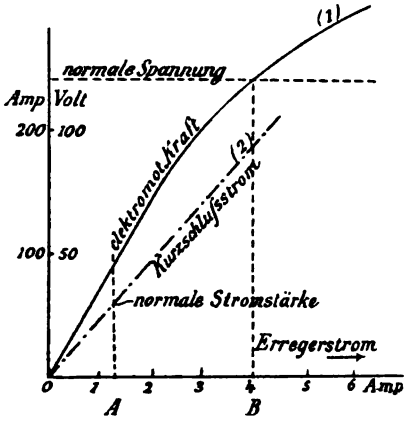
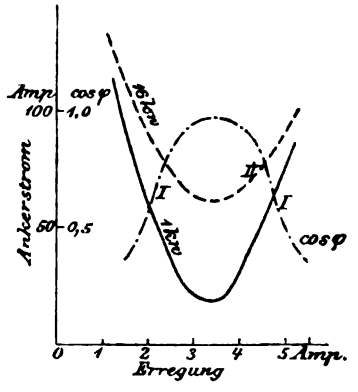


Fig. 19.



2. Verwendung von übererregten Synchronmotoren, deren $\cos \varphi$ durch Aenderung der Erregung beliebig verändert werden kann, Fig. 19; auf dem ansteigenden Ast ist der $\sphericalangle \varphi$ negativ, rechts positiv. Der Synchronmotor wird gewöhnlich sehr gross, wenn er wirksam sein soll, er sollte deshalb nicht leer laufen, sondern irgendwie nutzbar belastet oder als Umformer benützt werden.

3. Aufstellung von asynchronen Induktionsgeneratoren, deren Anker auf Kapazität oder nach Leblanc[1]) auf einen Oscillator oder eine andere besondere Erregermaschine geschlossen ist.

4. Forderung eines hohen $\cos \varphi$ vom Netz. $\cos \varphi = 0{,}90$ bis $0{,}95$ ist von einpferdigen Motoren ab mit gewöhnlichen Hilfsmitteln zu er-

[1]) Bull. Soc. El. Int. Paris 1898 und 1899.

Digitized by Google

reichen. $\cos \varphi = 1$ kann durch besondere Erregung der Anker der Induktionsmotoren nach Leblanc[1]) erreicht werden.

Die Mehrphasenmaschine, im speziellen die dreiphasige, hat die Einphasenmaschine sehr in den Hintergrund geschoben. Nur für Anlagen mit fast ausschliesslicher Beleuchtung wird der Einphasengenerator noch verwendet, da die Leitungsanlage einfacher und die Spannungsregulierung günstiger wird. Die meisten Firmen verwenden ihre Mehrphasenmodelle auch für Einphasenstrom, indem $^1/_3$ des Wickelraumes leer bleibt, z. B. bei einer Dreiphasenmaschine mit einer Nute pro Pol und Phase werden für Wechselstrom die Spulen von der ersten in die dritte Nute, dann von der vierten in die sechste Nute etc. gewickelt, die zweite, fünfte etc. Nute bleibt leer. Würde man das letzte Drittel auch noch vollwickeln, so würde die Leistung um kaum 15 % steigen, da sich die zukommende elektromotorische Kraft unter einem sehr grossen Winkel mit der vorhandenen zusammensetzt. Das gleiche Modell leistet also einphasig nur $^2/_3$ oder, wenn man gleichen Kupferverlust (also geringeren Wirkungsgrad) zulässt, nur $\frac{\sqrt{1{,}5}}{\sqrt{3}} = 71\,\%$ von der Dreiphasenleistung. Die Ankerrückwirkung der Einphasenmaschine ist in diesem Falle um etwa 20 bis 30 % grösser.

Unter den Mehrphasenmaschinen halten sich die zwei- und dreiphasigen ziemlich die Wage, eine ∞phasige würde bei gleichem Materialaufwand allerdings um 5 bis 10 % mehr leisten (Gleichung 17), aber der vielen Leitungen halber wird man für Verteilungsnetze nie über zwei bis drei Phasen hinausgehen, da schon die Notwendigkeit dreier Leitungen hie und da gegen die Verwendung von Drehstrom spricht. Für Netze mit vorwiegender Lichtabgabe empfiehlt sich das monocyklische System Fig. 20: die Beleuchtung liegt in der Hauptphase, die Motoren, die dreiphasig gewickelt sind, sind überdies an die Hilfsphase angeschlossen.

Die Induktorgleichpoltype (Fig. 2), die vor einigen Jahren viel Aufsehen machte, verschwindet mehr und mehr wieder von der Bildfläche, obwohl sie für besondere Fälle ihre Berechtigung hat. Sie wird jedoch bei gleicher Leistung und gleicher Umfangsgeschwindigkeit schwerer und teurer als die Wechselpoltype. Die Ausführung der grossen Erregerspule bereitet bei grossen Typen nennenswerte Schwierigkeiten. Die Streuung der Maschine, namentlich in aussenliegendes Eisen, ist ganz beträchtlich, da man der einseitigen Magneti-

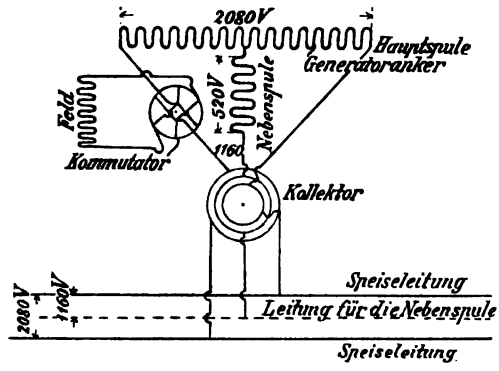
[1]) Bull. Soc. El. Int. Paris 1898 und 1899.

Digitized by Google

sierung halber hohe Sättigungen und grosse Oberflächen bezw. Querschnitte, welche die Streuung begünstigen, anwenden muss. Für das Parallelschalten kann die Erscheinung, dass die Gleichpoltype in der Regel unsymmetrische Spannungskurven, d. h. Kurven mit $\sin 2\omega t$, $\sin 4\omega t \ldots$ liefert, verhängnisvoll werden. Die Induktortype ist nur dann am Platz, wenn hohe Umlaufszahlen Umfangsgeschwindigkeiten erheischen, die mit der Wechselpoltype nicht zu erreichen sind.

Falls die Erregerwickelung des Generators nicht an ein bestehendes Gleichstromnetz angeschlossen werden kann, wird zur Erregung eine besondere Erregermaschine aufgestellt, deren Anker in der Regel direkt auf der Generatorachse sitzt (Fig. 1). Die Erregermaschine wird allerdings kleiner, wenn man sie durch Riemen, Zahnräder oder Schnecke vom Generator aus antreibt. Riemenantrieb er-

Fig. 20.



fordert aber viel Raum und ist nicht ganz betriebssicher. Neuerdings werden auch rotierende Umformer zur Erregung benützt. Der Antrieb der Erregermaschine durch einen besonderen Kraftmotor hat den Vorteil, dass sie nicht an den Tourenschwankungen des Generators teilnimmt, abgesehen bei Antrieb durch einen Drehstrommotor vom Netze.

Von einer Kommutierung des Hauptstromes zur Compoundierung der Maschinen kommt man wieder ab, und zwar auch in Amerika, wo das Verfahren ziemlich beliebt war. Der Kommutator besitzt so viele Segmente als Pole, alle geraden Segmente sind verbunden, ebenso alle ungeraden. Nur durch Verwendung von Doppelbürsten eventuell von Hilfssegmenten ist es häufig möglich, funkenlose Kommutierung zu erzielen. Bei Mehrphasenmaschinen ist die Funkenbildung geringer als bei einphasigen. Ein Hauptfehler, der dieser Compoundierung an-

Digitized by Google

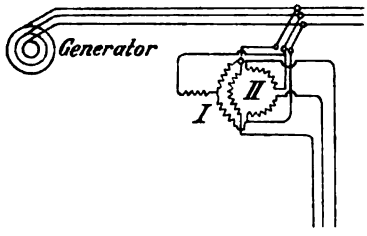
haftet, ist der, dass sie auf eine Phasenverschiebung nicht Rücksicht nimmt. Man hat zur Regulierung von Hand gewöhnlich einen Widerstand parallel zur dicken Erregerwickelung gelegt, der zugleich funkenmildernd auf die Kommutierung wirkt.

Der Erregerstrom, auch derjenige von Mehrphasenmaschinen, zeigt infolge der Ankerrückwirkung einen etwas undulierenden Verlauf. Der Erregerstrom einer Drehstrommaschine von Siemens & Halske liess sich z. B. darstellen durch

$$1 + \frac{1}{66} \sin\left(6\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{132} \sin(2\omega t + \pi) \quad . \quad . \quad (26)$$

Die Klemmenspannung von Wechselstrommaschinen wird durch Ein- und Ausschalten von Widerstand im Erregerkreis konstant gehalten. Ist die Erregermaschine im Nebenschluss erregt, was den wirtschaftlichsten Betrieb ergibt und eventuell auch eine Stromabgabe für andere Zwecke ermöglicht, so liegt ein Regulator im Haupterregerkreis — in der Regel derjenige für feine Abstufungen — und einer im Nebenschlusskreis. Beide sind mit Rücksicht auf die Magnetisierungscharakteristik der Haupt- und Erregermaschine zu bauen. Mit Hilfe eines Spannungsrelais lassen sich die Regulatoren selbstthätig ausführen; solche automatische Apparate sind aber immer etwas träge oder sie neigen zu Ueberregulierung. Eine Spannungsregulierung ist auch durch Drosselspulen oder Zusatztransformatoren im Hauptstrome möglich. Zusatztransformatoren für Drehstrom bestehen aus einem Induktionsmotor, dessen Feldwickelung II im Hauptstrom und dessen Ankerwickelung I an der Netzspannung liegt (Fig. 21). Durch Drehung der letzten Wickelung um verschiedene Winkel lässt sich die Zusatzspannung variieren. Die gegebene Zusatzmaschine ist der asynchrone Induktionsgenerator, der einfach hinter den Hauptgenerator geschaltet wird. Mit zunehmender Stromstärke nimmt die Zusatzspannung von selbst zu. Der Zusatzgenerator wird übersynchron angetrieben, sein Läufer ist zweckmässig auf variablen Widerstand bezw. Kapazität geschlossen. Bei kurzgeschlossenem Läufer kann der Induktionsgenerator nur Spannungen in Richtung des Stromes abgeben.

Fig. 21.

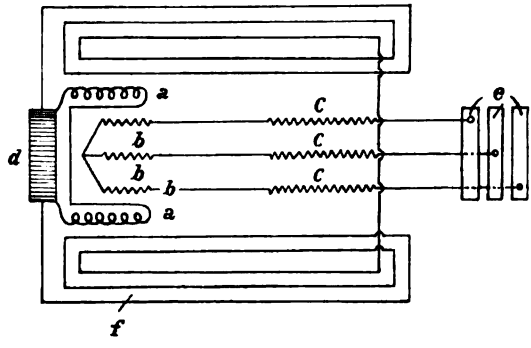


Seit einiger Zeit werden von Hutin-Leblanc, Danielson und der General Electric Co. Compoundwickelungen von ganz

Digitized by Google

besonderem Prinzip verwendet. Dabei wird eigentlich die Erregermaschine compoundiert; auf den Anker A derselben ist ausser der Gleichstromwickelung a (Fig. 22 von Danielson) eine Drehstromwickelung b gelegt, die vom Hauptstrome gespeist wird. Diese Wickelung liegt derart, dass sie eine resultierende Ampèrewindungszahl AW_s erzeugt, welche die Feld-AW der Erregermaschine, die mit f bezeichnet sind, bei Phasennacheilung verstärkt und bei Phasenvoreilung schwächt. Die erregende Spannung steigt also mit der Belastung, wenn sie induktiv ist, und zwar um so mehr, je grösser φ wird. Diese Compoundierung berücksichtigt also die Belastung J und den Phasenwinkel φ. Bei Verwendung solcher Erregermaschinen ist es möglich, konstante Klemmenspannung bei allen Belastungen zu erzielen, selbst wenn der Generator an sich eine beträchtliche Ankerrückwirkung hat. Man kann also den

Fig. 22.



Generator kleiner und wesentlich billiger halten. Diese Compoundierung ist besonders für Netze mit stark schwankender Motorbelastung von Vorteil, da eine Abnahme der Spannung sich auf die Zugkraft und Ueberlastungsfähigkeit der Motoren im Quadrat bemerkbar macht. Leblanc hat durch entsprechende Wahl der Induktion erreicht, dass ein Generator bis beispielsweise 20 % Ueberlast korrekt compoundiert, aber bei Kurzschluss nur das $1\frac{1}{2}$fache des normalen Stromes erzeugt.

Der Wirkungsgrad η einer Wechselstrommaschine ist

$$\eta = \frac{A_e}{A_m} = \frac{A_e}{A_e + A_v} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (27)$$

wenn A_e die abgegebene, A_m die zugeführte Leistung und A_v die Effektverluste sind. A_v setzt sich zusammen aus den Effektverlusten in der Ankerwickelung, in der Erregerwickelung, den Effektverlusten im Eisen

Digitized by Google

durch Hysteresis und Wirbelströme und denjenigen für Lager-, Bürsten- und Luftreibung.

Der Verlust in der Ankerwickelung ist im wesentlichen durch den Ohmschen Widerstand unter Berücksichtigung der Oberflächenwirkung bedingt; ausserdem kommen noch Wirbelströme in den Leitern in Frage, die aber bei Nuten- und Lochankern gering sind. Bei runden Drähten sind diese Wirbelstromverluste proportional dem Quadrate des Durchmessers, der Periodenzahl und der Induktion, der sie ausgesetzt sind ($cn^2B^2d^2$), bei rechteckigem Querschnitt ist der Zusammenhang bezüglich der Querschnittsabmessungen komplizierter [1]). Diese Wirbelströme lassen sich durch Abschrägen der Pole vermindern. Die Leitungsverluste beim Uebergang an Schleifringen berechnen sich, unter Zugrundelegung von 0,01 bis 0,03 Ohm pro Quadratcentimeter bei Metallbürsten, von 0,1 bis 0,4 Ohm pro Quadratcentimeter bei Kohlenbürsten. Die Erregerenergie ist einfach das Produkt aus dem Erregerstrom und der Erregerklemmenspannung. Bei direkter Kuppelung der Erregerdynamo wird meist die ganze Antriebsenergie für letztere und der Verlust in den Regulierwiderständen eingerechnet.

Die Hysteresisverluste werden am besten für die benützte Eisensorte direkt bestimmt, und zwar in Abhängigkeit der Induktion. Sie wachsen praktisch genügend genau proportional mit der Periodenzahl. Die Hysteresisbeträge, die ballistisch bezw. überhaupt magnetostatisch oder durch Wechselstrommagnetisierung (in Transformatoren) ermittelt sind, gelten für die hier in Frage kommende drehende Magnetisierung nicht, sie sind um 20 bis 50 % zu klein [2]). Ueberdies ist bei der Berechnung der Magnetisierung zu berücksichtigen, dass in der Regel die Kraftlinienverteilung über den Ankerquerschnitt eine ungleichmässige ist, weshalb die Verluste über den Querschnitt integriert werden sollten. Bei Belastung werden die Hysteresisverluste wegen der Induktionssteigerung durch die Feldverzerrung und wegen des Ohmschen Abfalles grösser.

Die Wirbelstromverluste pro Kilogramm in Watt berechnen sich angenähert aus

$$0{,}2\left(s\,\frac{n}{100}\,\frac{\frac{c}{2}\,B_{max}}{1000}\right)^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (28)$$

wenn s die Blechdicke in Millimetern, $\frac{c}{2}$ der Formfaktor (Gleichung 2)

[1]) E.T.Z. 1898, p. 690.

[2]) E.T.Z. 1898, p. 688 und 1899, p. 766.

Digitized by Google

ist. Für diese Verluste gilt übrigens alles, was eben für die Hysteresis erwähnt wurde. (Statt 0,2 finden sich Werte bis 1,0.)

Die Hysteresis- und Wirbelstromverluste in trapezförmigen Zähnen sind in Watt[1])

$$V_z \{\eta f_1(\alpha) n (B_z)^{1,6}_{max} + \varepsilon f_2(\alpha) n^2 (c B_z)^2_{max}\} 10^{-7} \quad . \quad . \quad . \quad (29)$$

wenn V_z das Zahnvolumen, η und ε Materialkonstanten sind, die für das betreffende $(B_z)_{max}$ besonders bestimmt sein müssen;

$$f_1(\alpha) = 5 \frac{1-\alpha^{0,4}}{1-\alpha^2}, \; f_2(\alpha) = \frac{2}{1-\alpha^2} \log_n \left(\frac{1}{\alpha}\right);$$

$(B_z)_{max}$ ist die kleinste Zahninduktion, α das Verhältnis kleinste Zahnstärke zur grössten. Bei anderen Nutenformen sind andere Koëffizienten, $f_1(\alpha)$ und $f_2(\alpha)$, zu verwenden.

Für die Induktortype ergeben sich die Eisenverluste zu (Fig. 23)

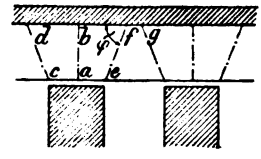
$$10^{-7} V \left\{\eta \left[\left(\frac{B_a - B_r}{2}\right)^{1,6} + (B_a \cos\varphi)^{1,6}\right] f_1(\alpha) \,.\, n \right.$$
$$\left. + \varepsilon \left[\left(\frac{B_a - B_r}{2}\right)^2 + (B_a \cos\varphi)^2\right] f_2(\alpha) \,.\, n^2 \right\} \quad . \quad . \quad . \quad (30)$$

wenn B_a die maximale Induktion und B_r die Remanenz am inneren Eisenumfang längs c a e ist und

$$f_1(\alpha) = 5 \frac{\alpha^{0,4} - 1}{\alpha^2 - 1}, \; f_2(\alpha) = \frac{2}{1-\alpha^2} \log_n(\alpha), \; \alpha = \frac{df}{ce}.$$

Die Wirbelstromverluste in den Zähnen sind gewöhnlich grösser wie angegeben, da der Rand der Zähne fast immer metallisch verschmiert ist und die maximale Zahninduktion grösser ist, als wie sie sich unter Annahme gleicher Feldverteilung im Luftspalte ergibt. Die üblichen Eisenbleche haben eine Stärke von 0,5 mm, hie und da auch von 0,3 mm.

Fig. 23.



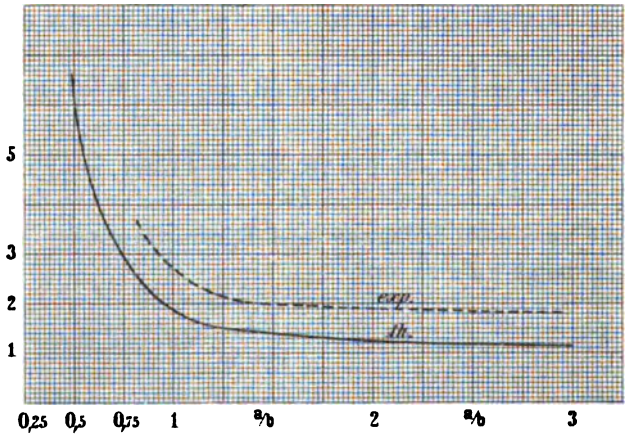
Bei sehr grober Nutteilung und offenen Nuten, namentlich bei Zacken- oder Polankern, treten im ganzen Magnetgestell Kraftlinien-

[1]) Das Gesetz $B^{1,6}$ ist besonders für hohe Induktionen und drehende Magnetisierung sehr ungenau, aber für die Rechnung existiert nichts anderes, wenn man statt 1,6 nicht einfach x setzen will. η muss allerdings für jede mittlere Induktion gesondert ermittelt werden.

Digitized by Google

fluktuationen auf, die zu kräftigen Wirbelströmen Veranlassung geben, falls nicht das ganze Gestell geblättert wird. Bei Nutenankern treten jedoch auch, wenn der gesamte Kraftlinienfluss konstant bleibt, Wirbelströme in den Polen auf, da die Kraftlinienverteilung mit der Nutenstellung variiert [1]). Dieser Eisenverlust in den Polen wird erst von einer gewissen Grösse des Verhältnisses $\frac{\frac{1}{2}\text{ Zahnbreite oben}}{\text{Luftspalt}} = \frac{a}{b}$ an und bei einem gewissen Wert des Verhältnisses $n = \frac{\text{Zahnteilung}}{\text{Zahnbreite oben}}$ von Bedeutung. Dieses letzte kritische Verhältnis heisse n_0. Der Wert n_0 ist von $\frac{a}{b}$ abhängig und in Fig. 24 (th) aufgezeichnet. An dieser Grenze

Fig. 24.



tritt nun ein, dass am Polrand die Induktion von einem Maximum bis Null bezw. zur Remanenz wechselt, während vorher das Feld verhältnismässig wenig variierte. Experimentell findet man, dass diese Grenze, wo die Polverluste gross werden, d. h. eine starke Erwärmung eintritt, etwas höher liegt: Kurve — — Fig. 24. Für die Verluste in den Polen lässt sich angenähert auf theoretisch-experimenteller Basis in Watt schreiben:

$$u\,z\,V\left(\frac{B_{max}-B_{min}}{2}\right)^{1,6}10^{-13}+\frac{4\,.\,10^{-15}\,u^2z^2\left(\frac{B_{max}-B_{min}}{2}\right)^2u^2a^2V}{1+\left(\frac{u\,D^2\mu}{10^5\,z\,\sigma}\right)^2} \quad (31)$$

[1]) E.T.Z. 1899, p. 766.

Digitized by Google

wenn V das Volumen der Pole, u die minutliche Tourenzahl, z die gesamte Zahnzahl, $B_{max} - B_{min}$ die grösste Induktionsdifferenz am Polrand, D der Ankerdurchmesser, μ die Permeabilität, σ der spezifische Widerstand von Eisen (= 0,1) ist.

Zur Vermeidung dieser Verluste werden die Pole häufig unterteilt entweder in axialer Richtung oder wie meist senkrecht dazu. Die Unterteilung im ersten Falle sollte kleiner als 2na, im letzten kleiner als na sein.

Auch in Endscheiben und Ankerbolzen entstehen, wenn sie nicht isoliert sind, unter Umständen nennenswerte Wirbelströme, die bei Bolzen zugleich stark entmagnetisierend wirken können, weshalb die Bolzen zum Zusammenhalten der Bleche möglichst nach dem Umfang zu rücken oder ganz ausserhalb der Bleche zu legen sind.

Die Lagerreibung lässt sich für die gebräuchlichen Lagerdrücke am besten durch die Beziehungen von Dettmar[1]) fassen und zwar in Watt

$$49\,r\,.\,d\,.\,l\,.\sqrt{w^3} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (32)$$

oder

$$\frac{-T_a + \sqrt{T_a^2 + 62\,u\,s\,\sqrt{w^2}}}{0{,}64\,u}\,d\,.\,l \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (33)$$

d, l sind Zapfendurchmesser und -länge in Centimetern, w die Wellengeschwindigkeit in Metern, T_a die Aussentemperatur, r, u und s Konstante und zwar angenähert r = 0,15, u = 25, s = 50.

Die Luftreibung ist nur bei raschlaufenden Ankern und bei besonderer Ventilation, wozu auch rotierende Polkreuze und schaufelförmige Wickelungsteile gehören, nennenswert und kann dann leicht 1 bis 2% der Leistung ausmachen.

Die Bürstenreibung in Watt ist

$$9{,}81\,f\,.\,p\,.\,Q\,.\,v\,. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (34)$$

v Umfangsgeschwindigkeit in Metern, Q gesamter Bürstenquerschnitt in Quadratcentimetern, p spezifischer Druck der Bürste = 0,05 bis 0,2 kg, f Reibungskoëffizient = 0,1 bis 0,5 und zwar lässt sich letzterer Wert auch bei Metallbürsten beobachten.

In Fig. 25 ist der Wirkungsgrad eines Dreiphasengenerators in Abhängigkeit des äusseren Stromes gezeichnet. In der gleichen Figur ist die Abhängigkeit der elektromotorischen Kraft E (verkettet) von dem

[1]) E.T.Z. 1899.

Digitized by Google

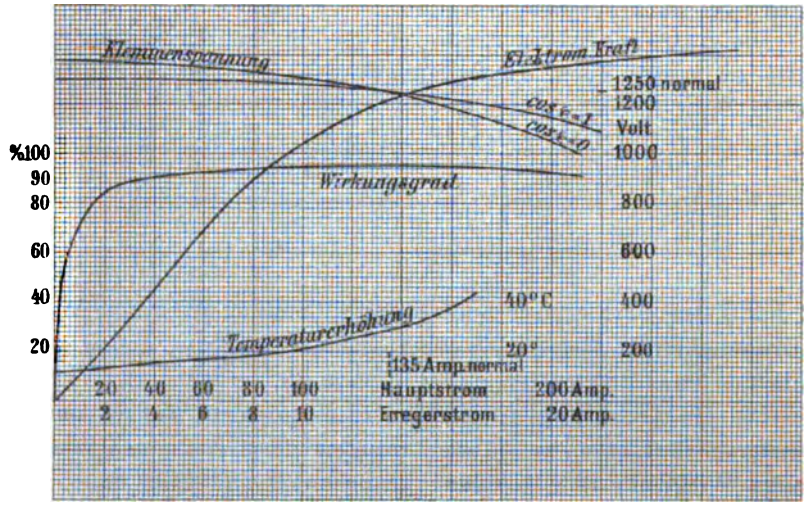
Erregerstrom und die Klemmenspannung bei verschiedenen Ankerströmen für $\cos \varphi = 1$ und $\cos \varphi = 0$, sowie die mittlere Maschinenübertemperatur bei verschiedenen Belastungen für Dauerbetrieb gegeben.

Die Erwärmung T über Aussentemperatur irgend eines Maschinenteils lässt sich angenähert ermitteln aus

$$T = \frac{C \cdot A_v}{O\,(1 + 0{,}1\,v)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (35)$$

wenn A_v die Verluste in Watt, O die abkühlende Oberfläche in Quadratcentimetern und v deren Geschwindigkeit bezw. diejenige der vorbeistreichenden Luft in Metern ist. Bei Spulen ist die äussere Ober-

Fig. 25.



fläche voll und die Flantschen und Innenflächen nur zu etwa $^1/_4$ einzusetzen; ähnlich ist bei Ankern vorzugehen. C ist dann für Anker etwa 300 bis 400, statt C ist für Spulen C (1 + 0,2 s) zu setzen, wenn s die Wickeltiefe in Centimetern ist. Da bei Kollektoren im Innern keine Wärme erzeugt wird, sondern alles auf der Oberfläche, so ist C auch nur die Hälfte, nämlich etwa 150 bis 200, wenn die freien Oberflächen des Kollektors alle ausser dem Aussenmantel nur zu $^1/_2$ bis $^1/_4$ eingesetzt werden. Um die Erwärmung mässig zu halten, sollte die Induktion bei n = 50 Perioden im Ankereisen 5000 bis 7000 nicht überschreiten (bei Ventilation eventuell etwas mehr), in den Zähnen, wenn sie lange sind, $B_{max} \leqq 10\,000$, bei runden Nuten kann B_{max} in den Zähnen bis 18 000 betragen. Die Stromdichte pro Quadratmillimeter in den

Digitized by Google

Ankerleitern ist bei grossen Maschinen etwa 2 bis 3 Amp., bei kleinen bis 5 Amp.; in der Erregerwickelung 0,8 bis 1,5 Amp., bei kleinen Maschinen bis 3 Amp. An Schleifringen mit Metallbürsten geht man bis 100 Amp. pro Quadratcentimeter, bei Kohle auf bis 20 Amp. pro Quadratcentimeter, für Kollektoren sollte die Hälfte nicht erreicht werden.

Neuerdings werden die Maschinen gewöhnlich mit radialen Ventilationskanälen durchsetzt, bei Innenpolmaschinen legt man sie in der Regel in den äusseren Teil, da die rotierenden Pole die Luft durch dieselben treiben, bei Aussenpolmaschinen in den rotierenden Anker, wobei in den Schlitzen Schaufeln untergebracht sind.

Für grössere Maschinen sollte als oberste Grenze der Temperaturerhöhung 40 bis 45 ° C. festgelegt werden und zwar bei Messung aus der Widerstandszunahme der Wickelungen.

Die Nuten oder Löcher, in welche die induzierte Wickelung gelegt wird, haben verschiedene Formen angenommen, von denen einige in Fig. 26 skizziert sind. Bei Niederspannung, d. h. bis ca. 1000 Volt,

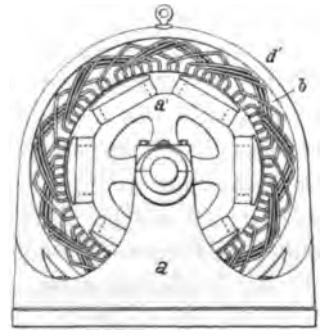
Fig. 26.

wird in der Regel für grössere Leistungen Stabwickelung verwendet mit 1, 2 oder 4 runden oder viereckigen Stäben pro Nute. Die Endverbindungen werden entweder als Fass- oder Mantelwickelung (cylindrisch) oder als Seitenwickelung mit Gabeln in einer Ebene senkrecht zur Achse hergestellt. Die Stabwickelung wird häufig schleichend ausgeführt, wie dies z. B. Fig. 27 und 28 zeigt (1, 2, 3 mit dem Pfeil nach oben sind die Anfänge, 1, 2, 3 mit dem Pfeil nach unten die Wickelenden), die dem U.-S.-P. 633856 von Lamme entnommen sind, obwohl die eigentliche Drehstromspulenwickelung (Fig. 6) ausgiebiger ist. Bei Hochspannung ist nur Drahtwickelung üblich; die Nuten werden entweder mit entsprechend starken, geschlossenen Isolationshülsen ausgefüttert und die Drähte durchgezogen oder es werden die Spulen auf der Drehbank gewickelt, mit Band umwickelt, in besonderem Isolationslack getränkt und getrocknet, um dann noch von Glimmer oder anderem umgeben in die offene Nute eingelegt zu werden, worin sie mit Keilen festgehalten werden. Ein Ersatz ist dann leicht auszuführen. In der Hochspannungs-Wechselstromtechnik spielen die

Digitized by Google

Isolationsmaterialien eine sehr grosse Rolle. Es ist von ihnen hohe elektrische Isolationsfähigkeit auch bei einiger Erwärmung, genügende mechanische Festigkeit bei allen vorkommenden Temperaturen und trotzdem eine gewisse Elastizität, sowie Freiheit von Hygroskopizität zu verlangen. Verwendet wird Glimmer, Hartgummi, geöltes oder mit Lack getränktes Papier und in gleicher Weise behandelte Leinwand,

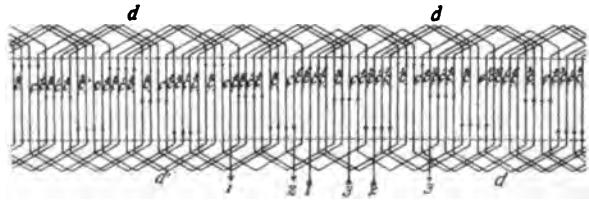
Fig. 27.



Pressspahn, Fiber, Vulcanasbest (Asbest und Gummi), Schiefer, Marmor, Asbest.

Die Umfangsgeschwindigkeit der Wechselstrommaschinen ist fast allgemein höher als bei Gleichstromgeneratoren. Für Innen- und Aussenpolmaschinen sind 20 bis 40 m Umfangsgeschwindigkeit pro Sekunde gebräuchlich, bei der Induktortype bis über 50 m.

Fig. 28.



Als Periodenzahl ist in Europa 50 pro Sekunde am verbreitetsten, da dabei noch eine einwandfreie Glühlichtbeleuchtung und eine im Freien noch befriedigende Bogenlichtbeleuchtung möglich ist. Die Motoren lassen sich für diese Periodenzahl noch rationell bauen und der induktive Abfall bei Kraftübertragungen ist noch mässig. Für reine Kraftübertragungen kommt auch die Zahl 40 bis 42 pro Sekunde

Digitized by Google

(Brown, Boveri & Co). und sogar 25 (Niagaraübertragung) vor. In Amerika finden sich besonders die beiden Zahlen 60 und ca. 130; letztere für enge Beleuchtungsnetze.

Ueberschlägig lässt sich die Leistung A einer Wechselstrommaschine in Kilowatt durch die Beziehung charakterisieren:

$$A_e = C \cdot d^2 l u \cdot 10^{-6} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (36)$$

d, l Durchmesser und Länge im Luftspalt in Centimetern und u minutliche Tourenzahl. Bei Drehstromgeneratoren schwankt C etwa zwischen 0,5 und 1,5, wenn $A_e > 50$ KW; mit grösser werdendem Durchmesser wird auch C grösser. Besser setzt man $A_e = C!(d^2 l)^{1,2}$ u. 10^{-6}.

Das Feldgestell von Drehstrommaschinen wird gewöhnlich so bemessen, dass bei Verwendung von Stahl oder Schmiedeeisen die Induktion in den Polen 14000 bis 17000, im Joch 10000 bis 14000; bei Gusseisen 6000 bis 8500 bezw. 4000 bis 7000 beträgt. Im Luftspalt schwankt der Induktionswert zwischen 4000 und 10000. Innenpolmaschinen haben fast ausschliesslich Stahl- oder Schmiedeeisenpole und Polerweiterungen, Gusseisenaussenpolmaschinen zeigen gewöhnlich keine Polschuhe. Die Pole der Innenpolmaschinen oder deren Polschuhe werden vielfach aufgeschraubt (Fig. 1) oder aufgekeilt, um die Erregerspulen auf der Drehbank wickeln zu können. Das Verhältnis Polbreite zu Teilung bewegt sich zwischen 0,55 und 0,75, die Grösse des Luftspaltes bei mittleren Maschinengrössen zwischen 5 und 8 mm. Um Reparaturen an jeder Stelle des Umfanges gleich bequem vornehmen zu können, wird bei grossen Generatoren das feststehende Gehäuse drehbar angeordnet und zwar dreht es sich entweder auf besonderen Ansätzen der Lagerböcke (Brown, Boveri & Co.) oder auf dem Polrad (A.E.G.). Bequem ist es auch, wenn mit dem Feld oder dem Anker auf die Seite gefahren werden kann. — Der rotierende Teil der Generatoren hat meist wenigstens teilweise als Schwungrad zu dienen, wobei für die Schwungmasse m der Ausdruck $\frac{m v^2}{2}$ massgebend ist, worin v die Geschwindigkeit am Ende des Trägheitshalbmessers ist.

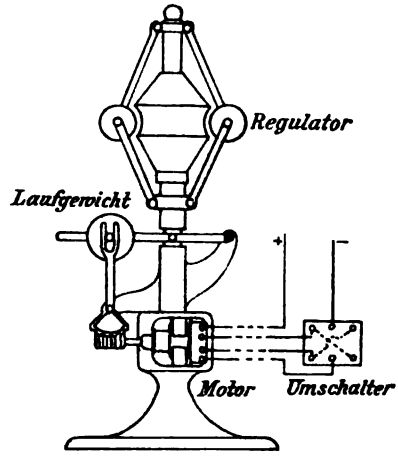
Für Innenpolmaschinen geschieht die Zuführung des Erregerstroms durch zwei Schleifringe, die Wechselströme werden von ruhenden Klemmen abgenommen, die bei Hochspannung entweder als mehrfache Isolatoren ausgebildet oder in starke und lange Isolationsröhren eingebaut werden. Maschinen mit rotierendem Anker muss der Wechselstrom durch zwei, drei oder vier Schleifringe entnommen werden, wes-

Digitized by Google

halb die Spannungen bei dieser Type 2500 Volt, in Europa 800 Volt, kaum überschreiten.

Der Antrieb der Wechselstromgeneratoren erfolgt von Dampfmaschinen, Gasmotoren oder Wassermotoren aus vermittelst Riemen- oder Seilübertragung oder auch vermittelst direkter Kuppelung. Zahnradübersetzung (Kegelräder) kommt für Turbinen vor; wenn allerdings die Tourenzahl der Turbine nicht zu gering ist, so sitzt die Dynamo direkt auf der vertikalen Turbinenwelle (Schirmtype). Als Dampf-

Fig. 29.



maschinen sind Zweicylindermaschinen zu empfehlen, deren Ungleichförmigkeitsgrad δ bei direkter Kuppelung $\geqq \frac{1}{200}$ bis $\frac{1}{250}$ sein soll, bei Riemenantrieb kann er geringer sein. Im ersten Falle sind also die Schwungräder recht kräftig zu halten. Bei Parallelbetrieb von Wechselstromgeneratoren, die mit Zweicylindermaschinen direkt gekuppelt sind, ist nämlich der Ausdruck $(45\,\delta\,p)^0$ ein Mass [1]) für die Güte des Parallelarbeitens, je grösser derselbe ist, desto eher fällt die Maschine ausser Tritt. Die Regulatoren müssen gute Dämpfung besitzen und dürfen nicht zu hin- und herpendelnder Bewegung geneigt sein; es muss möglich sein, das Regulatorgewicht zu verschieben (Fig. 29 [2]) und damit die Tourenzahl in bestimmten Grenzen zu variieren. Es ist möglichst

[1]) 2p Polzahl.

[2]) Von Siemens & Halske.

Digitized by Google

hohe Tourenzahl der Antriebsmaschinen zu verlangen, ohne dass deren Güte darunter leide.

Eine Wechselstrommaschine kann zu einer in Betrieb befindlichen parallel geschaltet werden, wenn beide auf gleiche Periodenzahl, auf angenähert gleiche Spannung und auf gleiche Phase eingestellt sind. Erstere Einstellung geschieht durch Verstellen des Regulators der Antriebsmaschine (Fig. 29), diejenige auf richtige Spannung durch Regelung des Erregerstromes; die gleiche Phase erkennt man an einem optischen oder akustischen Phasenindikator. Bei Mehrphasenmaschinen muss überdies das Ankerdrehfeld sich in beiden Maschinen im gleichen Sinn drehen, was, wenn es nicht der Fall ist, durch Vertauschen zweier Leitungen erreicht wird. Als Phasenindikatoren werden in der Regel Voltmeter oder Glühlampen verwendet, welche zwischen die Leitungen der beiden Maschinen geschaltet werden und bei annähernder Phasengleichheit langsam auf- und aboscillieren. Je nach der Schaltung ist beim Strom Null im Phasenindikator oder beim Maximum Phasengleichheit vorhanden. Bei Einphasengeneratoren ist der Indikator für mindestens doppelte Betriebsspannung, bei Dreiphasenstrom für um 15 % erhöhte Betriebsspannung zu bemessen. Die Last parallel geschalteter Maschinen wird durch Verstellen der Regulatoren der Antriebsmaschinen verteilt. Solange Wechselstromgeneratoren nicht über eine gewisse Grenze überlastet werden, ist ihr Parallelarbeiten stabiler Natur, im Gegensatz zur Hintereinanderschaltung, die nur bei zwangsläufiger Kuppelung möglich ist. Ueberschreitet der gegenseitige Phasenwinkel zweier Wechselstrommaschinen 45 °, so ist ein Aussertrittfallen zu befürchten; obwohl bei jeglicher Verschiebung, die zwischen beiden Generatoren auftritt, ein Ausgleichsstrom und zwar ein Arbeitsstrom entsteht, der eine Kontrolle, eine synchronisierende Kraft ausübt. Diese kontrollierende Kraft ist am grössten, wenn für jede Maschine

$$\frac{2\pi n L}{w} = 1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (37)$$

ist, d. h. wenn Selbstinduktion und Widerstand gleich sind, ein Zustand, der allerdings in modernen Maschinen nie ganz erreicht wird, da $2\pi n L = 2$ bis $10 \times w$ ist. Ausser dem erwähnten Arbeitsausgleichsstrom tritt noch bei Verschiedenheit der elektromotorischen Kräfte in beiden Maschinen ein wattloser Ausgleichsstrom auf. — Wenn auch obige Bedingung für die kontrollierende Kraft, die immer erstrebenswert ist, nicht erfüllt ist, lässt sich doch ein guter Parallelbetrieb erzielen, wenn man die Leistungsfähigkeit der Antriebsmaschinen so

Digitized by Google

beschränkt, dass eine zu grosse Phasenverschiebung durch Ueberlast ausgeschlossen ist und alle Ursachen zu Pendelungen vermeidet: Vermeidung plötzlicher grosser Belastungsänderungen, hoher Gleichförmigkeitsgrad, gut gedämpfte Regulatoren, Benützung elektrischer Dämpfer in Form von Kurzschlusswickelungen (Fig. 12 und 13). Verschiedene, besonders unsymmetrische Spannungskurven der einzelnen Maschinen wirken sehr ungünstig; günstig ist geringe Pol- und Periodenzahl. Von Gasmotoren angetriebene Generatoren werden zweckmässig wegen des geringen Gleichförmigkeitsgrades vor dem Parallelschalten mit der arbeitenden Maschine künstlich auf gleiche Belastung gebracht, was z. B. mit Hilfe der Wirbelstromschwungradbremse von Dettmar geschehen kann [1]). Um ein Umschlagen des Stromes von parallelgeschalteten Maschinen, also ein Arbeiten als Motor zu vermeiden, empfiehlt sich die Einschaltung von Rückstromausschaltern in jede Generatorleitung (Andrews, Electrician 1898, 6. Mai).

In der Natur des Dampfmaschinenkurbelgetriebes sind pro Umdrehung bestimmte Pendelungen der Geschwindigkeit begründet, die den Parallelbetrieb störend beeinflussen können. Die Dampfmaschine drückt der Dynamo (erzwungene) Schwingungen auf von der Schwingungszeit

$$T_a = \frac{60}{m \,.\, u} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (38)$$

(m Cylinder, u minutliche Tourenzahl). Die Dynamo wird dadurch zu Eigenschwingungen veranlasst, welche die Störung aufzuheben suchen; deren Schwingungsdauer ist ($g = 9{,}81$)

$$T = 2\pi \frac{u}{60} \sqrt{\frac{2 g \pi \Theta}{n E_k J_k \left(\cos \varphi + \frac{J}{J_k} \sin \varphi\right)}} \quad . \quad . \quad (39)$$

wenn Θ das Trägheitsmoment des rotierenden Teils der Dynamo, E_k die Klemmenspannung, J_k der Kurzschlussstrom für normale Erregung, J der Belastungsstrom und φ der Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung ist. Beide Schwingungen geben zu Schwebungen Anlass, die noch durch Resonanz verstärkt werden können. Die Schwebungen haben eine Amplitude, die proportional

$$\frac{T_a^2}{T^2 - T_a^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (40)$$

[1]) E.T.Z. 1899.

Digitized by Google

ist, weshalb als am gefährlichsten das Verhältnis $T = T_s$ zu vermeiden ist. Die Amplitude kann jedoch in jedem Falle durch Dämpfung, z. B. durch eine Käfigwickelung in den Polschuhen nach Leblanc beliebig verringert werden, indem die Dämpfung in der Form $+ c T_s^2$ in den Nenner des obigen Ausdrucks eingeht.

Die Theorie und der Aufbau des asynchronen Induktionsgenerators ist identisch mit der Theorie und Konstruktion des Induktionsmotors. Wird letzterer übersynchron angetrieben, so liefert er Strom. Mit der Belastung muss die Tourenzahl etwas zunehmen. Der Induktionsgenerator kann nur auf ein Netz arbeiten, dem die Cykelzahl und Spannung durch einen gewöhnlichen Wechselstromgenerator aufgedrückt ist. Das Netz bezw. die vom Induktionsgenerator übernommene Last muss überdies einen bestimmten $\cos \varphi$ haben, falls man nicht im Ankerkreis durch Kapazität und Selbstinduktion jeweils reguliert. Asynchrone Generatoren brauchen keine Gleichstromerregung, sind in gleicher Weise wie Gleichstrommaschinen insofern von der Antriebsgeschwindigkeit unabhängig, als sie ohne Synchronisierung und Phasengleichheit parallelgeschaltet werden können; bei Kurzschluss gehen sie einfach aus, ihre maximale Leistung ist grösser als diejenige beim Arbeiten als Motor. Ihrer Verwendung als Zusatzmaschine ist bereits Erwähnung gethan.

Leblanc[1]) versieht den Induktionsgenerator mit einer besonderen Schaltung im Anker, um es zu ermöglichen, ihm beim Parallelbetrieb mit gewöhnlichen Generatoren auch wattlose Ströme zu entnehmen bezw. bei Hintereinanderschaltung gegen den Strom um 90° verschobene Spannungen zu erzeugen. Er verschafft sich nämlich durch Einfügung von Kapazität C einen negativen Selbstinduktionskoëffizienten L'

$$L' = L - \frac{1}{4\pi^2 n_s^2 C} \quad \ldots\ldots \quad (41)$$

(n_s Schlüpfung über Synchronismus). Er erreicht jedoch denselben Zweck auch dadurch, dass er in den Anker eine besondere Erregermaschine legt, die aus zwei kleinen Gleichstrommaschinen auf einer Achse besteht, auf deren Anker die induzierten Wickelungen des Generators geschlossen sind, nachdem die induzierten Ströme vorher noch das Feld der Erregermaschinen durchflossen haben. Schliesslich verwendet Leblanc zu gleichem Zwecke eine oscillierende Spule (eine

[1]) Bull. Soc. El. Int. Paris 1898 u. 1899.

Digitized by Google

Art Galvanometerspule) in einem gleichstromerregten Magnetfelde, auf die der Generatoranker geschlossen wird. Durch die Oscillation des Oscillators (récuperateur) entsteht eine Selbstinduktion

$$L' = L - \frac{c B^2}{n_s \Theta} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (42)$$

worin L der ursprüngliche Selbstinduktionskoëffizient, B die Felddichte in der Spule, n_s die Schlüpfung, Θ das Spulenträgheitsmoment und c eine Materialkonstante ist.

Digitized by Google

Die drahtlose Telegraphie.

Von

Ingenieur **Adolf Prasch,**

k. k. Regierungsrat und Eisenbahnoberinspektor a. D. in Wien.

Mit 61 Abbildungen.

Einleitendes. Die Fernvermittelung von Nachrichten ohne Zuhilfenahme eines künstlichen Mediums, wie solches, bei Ausnützung elektrischer Kräfte für die gleichen Zwecke, durch die das Verbindungsglied herstellenden isolierten Drahtleitungen verwertet wird, also die drahtlose Telegraphie im weiteren Sinne des Wortes, bildet wohl die älteste Form des grössere Entfernung in raschester Weise überbrückenden Nachrichtendienstes. Die Feuersäulen Alexander des Grossen, den Sieg der Makedonier über die Perser nach Griechenland verkündend, die dröhnende Sturmglocke auf den Kirchtürmen, das Herannahen des Feindes oder den Ausbruch eines Brandes, der Donner der Kanonen, drohende Wassergefahr rasch und allseitig zur Kenntnis bringend, sind nichts anderes als die seit langem gekannten Uranfänge der drahtlosen Telegraphie. Diese Nachrichtenvermittelung war jedoch nur eine einseitige und in ihren Kundgebungen beschränkte. Selbe bedurfte, um zum Sprechen und Gegensprechen tauglich zu werden, noch sehr der Vervollkommnung. Die raumdurchdringende Kraft der akustischen Signale war jedoch eine viel zu geringe und unsichere, als dass sie überhaupt erfolgreich zur Fernvermittelung von Nachrichten zu verwerten gewesen wäre. Es fand sohin nur die optische Telegraphie, um deren Entwickelung sich die Gebrüder Chappe im 18. Jahrhundert dadurch grosse Verdienste erwarben, dass sie die Gesetze, welchen die zu verwendenden Einrichtungen zu entsprechen hatten, feststellten, vielfache Anwendung. Wenn auch durch den elektrischen

Digitized by Google

Telegraphen für den Ueberlandverkehr fast vollkommen verdrängt, so bleibt selbe heute noch für den Verkehr vom Lande zu den Schiffen und von Schiff zu Schiff unentbehrlich und hat für diesen Verkehr durch die Semaphor- und Flaggensignalisierung eine solche Ausbildung und Entwickelung erfahren, dass sie allen diesbezüglichen Anforderungen bestens entspricht. Aber auch für den Ueberlandverkehr findet sie, wenn auch nur ausnahmsweise und zwar hauptsächlich für Kriegszwecke, Verwertung, wie man dies aus den über den südafrikanischen Krieg anlangenden Nachrichten entnehmen kann. Hier wurden, nachdem man nunmehr über kräftige elektrische Lichtquellen verfügt, die alten Raketensignale durch die mächtigen Scheinwerfer ersetzt, welche eine fast unbegrenzte Verständigung ermöglichen. Dennoch entspricht die optische Telegraphie den heutigen erhöhten Bedürfnissen nicht mehr und wird in den angeführten Fällen eben nur aus dem Grunde verwendet, weil ein Ersatz für selbe noch nicht geboten ist. Die Ursachen liegen eben darin, dass die Entfernungen, bis zu welchen eine sichere Verständigung noch möglich ist, relativ sehr geringe sind, weil die Lichtstrahlen selbst bei reiner Atmosphäre von derselben absorbiert werden und sich sonach mit stetig zunehmender Entfernung abschwächen und endlich der Wahrnehmung entziehen. Bei staubiger und nebeliger Atmosphäre verstärkt sich diese Absorption um ein Bedeutendes und tritt auch noch die Diffusion des Lichtes hinzu, so dass sich die Entfernungen, bis zu welchen die Signale wahrgenommen werden können, noch mehr verkürzen und die Signale ausserdem nicht mit jener Deutlichkeit erscheinen, die für eine präzise Signalisierung unumgänglich notwendig ist. Um diesen Uebelständen zu begegnen, müssen für grössere Entfernungen zahlreiche Zwischenposten (Relais) aufgestellt werden, die nicht nur die Anlagekosten für die Einrichtung vergrössern, sondern auch den Betrieb wesentlich verteuern. Die Bedienung derartiger Signale erfordert, da die Sinne nicht wie bei akustischen Signalen alarmierend angeregt werden, ausserdem eine fortwährend gespannte Aufmerksamkeit, welche das Bedienungspersonal bald erschöpft, so dass für zwei- bis dreimalige Besetzung jedes Postens Vorsorge getragen werden muss. Ein weiterer Uebelstand der rein optischen Telegraphie ist ferner darin zu ersehen, dass die Mitteilungen von allen Seiten abgelesen werden können, so dass eine Geheimhaltung derselben, trotz Anwendung einer Geheimschrift kaum zu erzielen ist. Aus diesen einleitenden Bemerkungen ist zu ersehen, dass sowohl die akustische als die optische Telegraphie trotz ihrer relativen Einfachheit, weil ja beide sich zur Fortpflanzung der gegebenen Anregungen

Digitized by Google

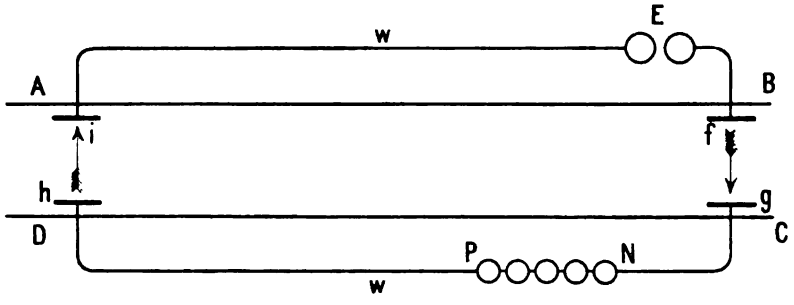
eines natürlichen Mediums, und zwar im ersten Falle der Luft, im zweiten Falle des hypothetischen Aethers bedienen, den komplizierten Verkehrsbedürfnissen der Gegenwart nicht mehr zu entsprechen vermögen und daher überall dort, wo es die Verhältnisse gestatteten, sehr bald durch den eines künstlichen Verbindungsgliedes benötigenden elektrischen Telegraphen verdrängt wurden. Wiewohl nun die Entfernungen, über welche mittels des elektrischen Telegraphen Mitteilungen weiter verpflanzt werden können, nahezu unbegrenzt sind, man erinnere sich nur der Kabelverbindungen durch die verschiedensten Meere unseres Weltteiles, so müssen diese Leitungen dennoch als unbequeme und kostspielige, leider aber dermalen noch unentbehrliche Beigaben unserer nunmehr auf einer sehr hohen Stufe der Entwickelung stehenden elektrischen Telegraphie angesehen werden. In Erkenntnis der Nachteile dieser Leitungen war der unermüdlich rührige Menschengeist bald darauf bedacht, Mittel zu ersinnen, um sich derselben, ohne auf die Vorteile, welche dieselben gewähren, zu verzichten, zu entledigen.

Historisches. Die Idee der Nachrichtenvermittelung durch den Raum, ohne Anwendung eines künstlichen Leitungsmittels und ohne Anwendung der bekannten Licht- und Schallphänomene, datiert eigentlich schon 200 Jahre zurück. Die Versuche gingen dahin, zwischen zwei bestimmten Punkten auf rein magnetischem Wege zu korrespondieren, konnten aber bei der damaligen noch geringen physikalischen Erkenntnis und den unzulänglichen Hilfsmitteln zu keinem befriedigenden Ergebnis führen, ebensowenig wie die schon Ende des vorigen Jahrhunderts zu Tage getretenen Bestrebungen, das gleiche Ziel auf elektrischem Wege zu erreichen. Der erste gelungene Versuch der drahtlosen Telegraphie stammt von dem Schotten James Bowmann Lindsay im Jahre 1831. Er beschränkte sich darauf, die Leitungen durch den Tayfluss zu ersparen, um über denselben seine Mitteilungen telegraphisch zu ermöglichen. Da anderweitig das Datum dieser Versuche auf das Jahr 1854 verlegt angegeben erscheint, ist es zweifelhaft, ob nicht das Verdienst, die erste erfolgreiche Anregung zur drahtlosen Telegraphie gegeben zu haben, dem Erfinder des nach ihm benannten Telegraphen „Samuel Finsley Morse“ zuzuschreiben ist. Derselbe schrieb im Januar 1844 an den „Secretary of the Treasury“ einen nachstehend im Auszuge gegebenen, in Alfred Vails Werk „The American Electro-Magnetic Telegraph“ 1845 vollinhaltlich abgedruckten Brief, aus welchem folgendes zu entnehmen ist: „Im Sommer 1842 unternahm ich über Ersuchen des amerikanischen Institutes einen

Digitized by Google

öffentlichen Versuch mit einem Telegraphen, um von Governors Island nach Castle Garden auf die Distanz von ca. 1 Meile zu telegraphieren. Zu diesem Zwecke verlegte ich einen wohlisolierten Draht unter das Wasser. Kaum hatte ich zu telegraphieren begonnen und etwa zwei oder drei Zeichen erhalten, so nahm ein mit schleppendem Anker vorbeifahrendes Schiff den Draht auf und zerstörte denselben. Durch diese Erfahrung angeregt beschloss ich, ein Mittel zu finden, um solche Zerstörungen für die Zukunft hintanzuhalten. Ich begann im Monat Dezember mit den diesbezüglichen Versuchen im Kanale von Washington und stellte dabei fest, dass die Elektrizität gezwungen werden konnte, durch den Fluss, ohne einen anderen Leiter als das Wasser selbst, hindurch zu gehen. Aber erst im Sommer verflossenen Jahres fand ich die Musse, durch eine Serie von Versuchen die Gesetze dieser

Fig. 1.



Passage festzustellen. Die folgende Zeichnung diene zur Erklärung des Experimentes. A, B, C, D (Fig. 1) sind die Flussufer, N P die die Batterien, E ist der Empfangselektromagnet, w w sind längs der Ufer führende Leitungsdrähte, welche mit den in das Wasser versenkten Kupferplatten h, i, f, g verbunden sind. Ist die gesamte Anordnung fertiggestellt, so geht die erzeugte Elektrizität von dem Pole P über den Draht w zur Platte h, über den Fluss zur Platte i und dann über den Elektromagnet E zur Platte f, über den Fluss zur Platte g und zum Pole N der Batterie zurück."

Wie später zu ersehen ist, sind die Anordnungen von Morse und Lindsay nahezu identisch. Einen ähnlichen Vorschlag erstattete im Jahre 1849 ein englischer Telegrapheningenieur Namens J. H. Wilkings in einem im „Mining Journal" vom 28. März 1849 veröffentlichten Briefe. Auf Grund vorhergehender, von Erfolg begleiteter Versuche hält er es für möglich, zwischen England und Frankreich

Digitized by Google

ohne Anwendung eines Drahtleiters zu telegraphieren und bringt hierfür folgende Anordnung in Antrag: 1. Man errichte eine 10 bis 20 Meilen lange Drahtleitung, deren Enden in die Erde gehen und zwischen welche eine kräftige, galvanische Batterie eingeschaltet ist, möglichst nahe und parallel zum Ufer. 2. Man errichte am gegenüberliegenden Ufer eine gleichartige Drahtleitung möglichst nahe zu demselben und möglichst parallel zur ersten Leitung. 3. In diese zweite Leitung schalte man ein Instrument ein, bestehend aus einer Reihe von 10 oder 20 Drahtspulen aus feinstem Drahte, grösster Leitungsfähigkeit. Diese Spulen werden entweder vor oder zwischen den Polen eines permanenten oder eines Elektromagneten drehbar aufgehängt. In jedem Falle, in welchem ein Strom die Drahtrollen durchfliesst, wird dies durch deren Drehung angezeigt. Von diesem Zeitpunkte an ist in Bezug auf die Bemühungen, die drahtlose Telegraphie zu verbessern, ein Stillstand eingetreten, bis im Jahre 1862 Haworth sich eine auf ähnlichen Prinzipien basierende Anordnung, welche übrigens keine Bedeutung erlangte, patentieren liess. Erst in den achtziger Jahren verflossenen Jahrhunderts machte sich wieder eine etwas rührigere Thätigkeit auf dem Felde der drahtlosen Telegraphie bemerkbar. So wurden der historischen Reihenfolge nach Patente auf Einrichtungen zur drahtlosen Telegraphie von Smith 1881 und 1887, Phelps 1884 und 1886, Dolbear 1886, Woods 1887, Ader 1888, Somzee 1888, Edison 1891 und 1892, Stevenson 1892, Sennet 1892, Evershed 1892 und 1896, Preece 1893, Rathenau 1893, Blake 1894 und Kitsee 1895 erworben. Einige von diesen Erfindungen hatten sich auch, wie später noch hervorgehoben werden soll, der praktischen Anwendung zu erfreuen. Den nachhaltigsten Anstoss zur Förderung der drahtlosen Telegraphie gaben jedoch die von Preece, dem berühmten englischen Telegraphentechniker, durchgeführten Versuche, so dass von da ab die Neuerungen und Anregungen in rascher Weise einander folgten. Alle die vorerwähnten Patente beziehen sich immer noch auf reine Leitungs- oder Induktionswirkungen, mit welchen die Entfernungen, bis auf welche hin sich Nachrichten vermitteln liessen, nur begrenzte sein konnten. Allerdings waren, wie die obigen Jahreszahlen erweisen, die berühmten Untersuchungen von Hertz, welcher in den Jahren 1888 und 1889 die Wellenbewegung der Elektrizität im freien Raume und so deren Fortpflanzungsfähigkeit in demselben experimentell nachgewiesen hat, schon Gemeingut aller Gebildeten geworden und hierdurch ein neuer Anhaltspunkt für die Entwickelung der drahtlosen Telegraphie gegeben, allein es bedurfte noch einer Reihe

Digitized by Google

von Untersuchungen und Entdeckungen, ehe hier praktisch ans Werk geschritten werden konnte. So musste erst ein Empfänger geschaffen werden von so hoher Empfindlichkeit, dass er bei Kollision mit den bereits sehr geschwächten elektrischen Wellen noch mit Zuverlässigkeit ansprach. Branly entdeckte im Jahre 1890 bei der Untersuchung von Metallpulvern auf deren elektrischen Leitungswiderstand, dass derselbe, welcher unter normalen Umständen praktisch als unendlich zu betrachten war, sobald das Pulver von elektrischen Wellen getroffen wurde, sich sofort auf eine messbare Grösse herabminderte. Auf Grund dieser Erscheinungen wurde von Lodge der Kohärer (Hafter) oder zu deutsch der Fritter bezw. die Frittröhre geschaffen. Durch glückliche Vereinigung der verschiedenen Apparate gelang es endlich Marconi, einem jungen, italienischen Studenten, nach langen mühevollen Experimenten im Jahre 1897 eine Anordnung zu treffen, welche der Telegraphie im Raume unter Verwertung der Hertzschen Wellen eine grosse Zukunft eröffnete und welche dermalen, wie die praktischen Versuche erweisen, die Ueberbrückung einer Entfernung von mehr als 150 km ermöglichen. Als eigentlicher Erfinder der sogenannten Wellentelegraphie ist jedoch Prof. Hughes, der Erfinder des nach ihm benannten Typendrucktelegraphen und des Mikrophons zu betrachten, welcher bereits im Jahre 1877 auf Grund zufälliger Beobachtungen eingehende Versuche durchgeführt hat, die die Telegraphie durch den Raum auf mehr als 500 m ermöglichten. Bei diesen Untersuchungen ergab sich auch schon die bemerkenswerte Erscheinung, dass an bestimmten Punkten, er bediente sich zur Aufnahme der Zeichen des Telephones, nichts gehört werden konnte, während an weiter entfernten Punkten die Zeichen deutlich auftraten, was wahrscheinlich durch Knotenpunkte, wie solche bei Interferenz der elektrischen Wellen entstehen, bedingt erscheint. Da die Hertzschen Untersuchungen zur Zeit dieser Versuche noch nicht bekannt waren, machte er hervorragenden englischen Gelehrten im vertraulichen Wege Mitteilungen über die gewonnenen Beobachtungsergebnisse. Dieselben hielten jedoch die Sache nicht für neu und meinten, dass sich selbe durch die Induktion erklären lassen. Auf Grund dieser Beurteilung unterliess er es, weitere Versuche in dieser Richtung anzustellen und wandte sich magnetischen Untersuchungen zu. In für jeden, der diesen seltenen Mann kennen gelernt hat, begreiflicher Bescheidenheit vermochte er sich nicht zur Veröffentlichung seiner bemerkenswerten Beobachtungsresultate zu entschliessen. Dieses Stillschweigen hat, da er alle Grundlagen für die Wellentelegraphie, wie aus den später veröffentlichten

Digitized by Google

Mitteilungen hervorgeht, bereits geschaffen hatte, dieselbe um mindestens 10 Jahre zurückgedrängt.

In gleicher Weise wurde der Kohärer bereits im Jahre 1884 von Prof. Temistocle Calzecchi-Onesti entdeckt und von selbem in einer Arbeit über „Die Leitungsfähigkeit metallischer Feilspäne" im Nuovo Cimento Bd. 16 und 17, 1884 und 1885, Mitteilung gemacht, über welche jedoch die Wissenschaft bedauerlicherweise hinweggegangen ist. Die von demselben beobachteten Phänomene gleichen im Geiste und Prinzipe der Sache völlig denen von Marconi und Lodge bezw. Branly.

Ebenso wurde noch, bevor die Marconische Anordnung bekannt wurde, von Prof. A. Popoff von der Offiziers-Minenklasse in Kronstadt, und zwar im Jahre 1895, eine Einrichtung geschaffen, welche dazu diente, die elektrischen Störungen in der Atmosphäre nachzuweisen. Dieselbe stimmt in der Anordnung und im Stromlauf genau mit den Marconischen Apparaten überein. Diese Einrichtung ist in dem Journale der Russischen Physikalisch-Chemischen Gesellschaft im Januar 1896 unter der Ueberschrift „Apparat zur Feststellung und Registrierung der elektrischen Schwingungen" beschrieben. Hierdurch erscheinen jedoch die Verdienste Branlys, Lodges und Marconis um die Entwickelung der Wellentelegraphie, wie dies Prof. Hughes in seinem bemerkenswerten Briefe vom 29. April 1899 an Herrn J. J. Fahie in London in anerkennenswerter Weise hervorhob, in keiner Weise beeinträchtigt.

Ausser den Verbesserungen, welche Marconi und Lodge an den Apparaten für die Wellentelegraphie zur Ausführung gebracht haben, hat sich in neuerer Zeit Béla Schäfer um die Ausgestaltung der Apparate, insbesondere durch Anwendung eines neuen Empfängers, besonders bemüht und waren die mit seinen Apparaten durchgeführten praktischen Versuche von Erfolg begleitet.

Da hier nur die drahtlose elektrische Telegraphie in den Bereich der Betrachtungen einbezogen werden soll, muss hier auch zweier Methoden zur Fernvermittelung von Nachrichten gedacht werden, bei welchen zwar das anregende Agens Lichtwellen sind, deren Wirkung jedoch auf elektrischen Erscheinungen beruht, die durch die Lichtwellen hervorgerufen werden, und zwar der Radiophonie und der lichtelektrischen Telegraphie.

Die Radiophonie, deren Entdecker und Entwickler der durch die Erfindung des Telephons berühmte M. Graham Bell ist, beruht auf der bereits im Jahre 1878 wahrgenommenen Erscheinung, dass Sele-

Digitized by Google

nium unter gewissen Umständen die Eigenschaft besitzt, bei Belichtung dem Durchgange des elektrischen Stromes einen geringeren Widerstand entgegenzusetzen, als wenn sich selbes im Dunklen befindet. Aehnliche Beobachtungen wurden auch beinahe zu gleicher Zeit von Willoughby Smith und Siemens gemacht. Bell setzte diese Untersuchungen im Vereine mit seinem Mitarbeiter Summer Tainter fort und kam zu dem Ergebnis, dass auch viele andere Materialien, wie Gold, Silber, Eisen, Elfenbein, Cellulose, Guttapercha, Papier, Holz, Glimmer, Glas etc. die gleichen Eigenschaften zeigen, dass aber Selenium, entsprechend präpariert, sich hierfür am empfindlichsten erwies. Auf Grund dieser Beobachtungen, welche auch darthaten, dass das Selenium den durch das Licht gegebenen Anregungen momentan folgt, ging er an die Schaffung einer Vorrichtung, welche einen Lichtstrahl auf eine entfernt gelegene Selenzelle leitete. Die Selenzelle war mit einer Batterie und einem Telephon in einen Stromkreis geschaltet, so dass jede Veränderung des Leitungswiderstandes der Selenzelle und die hiermit in Verbindung stehende Aenderung der Stromstärke im Telephon abgehört werden konnte. Durch entsprechende, sich in kurzen Intervallen wiederholende Abblendung der Lichtstrahlen konnten sohin Zeichen entsendet werden, die im Telephon deutlich zur Wiedergabe gelangten. Der so in vielerlei Formen und Abänderungen konstruierte Apparat, zum ersten Male im Jahre 1880 der Oeffentlichkeit vorgeführt, wurde anfänglich mit dem Namen Photophon und späterhin erst mit dem Namen Radiophon belegt.

Die lichtelektrische Telegraphie von Zickler, über welche im Jahre 1898 die ersten Nachrichten vor die Oeffentlichkeit gelangten, beruht auf der Erscheinung, dass Funken an der Funkenstrecke eines Induktoriums bei Bestrahlung der Funkenstrecke durch ultraviolettes Licht viel früher zur Auslösung gelangen, als dies ohne diese Bestrahlung der Fall ist. Wird nun beispielsweise das Licht einer elektrischen Bogenlampe, welches sehr reich an ultravioletten Strahlen ist, auf eine solche Funkenstrecke eines im Betriebe stehenden Induktoriums geworfen, so werden die Funken ausgelöst werden. Auf diese Weise kann, wenn der Lichtstrahl nach Massgabe des Bedarfes abgeblendet wird, eine Art der Telegraphie entwickelt werden. Die Abblendung des Lichtes erfolgt in diesem Falle nicht durch einen für das Licht undurchlässigen Körper, sondern einfach durch eine Glasscheibe, welche die Eigenschaft besitzt, das ultraviolette Licht zu absorbieren, so dass bei dieser Art der Telegraphie dem Auge eine Veränderung des Lichtstrahles nicht wahrnehmbar ist, sohin eine Aufnahme der

Digitized by Google

Depesche von einer anderen als der bestimmten Stelle zur Unmöglichkeit wird.

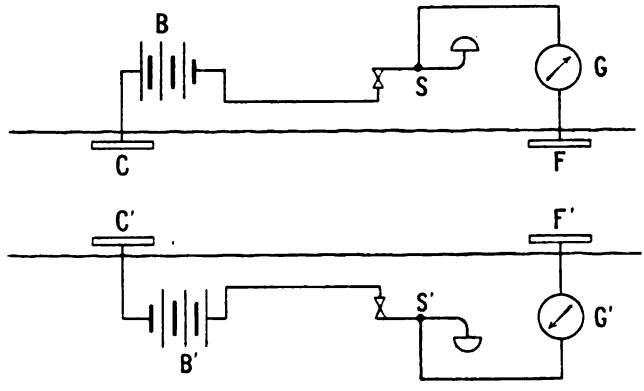
Verschiedene Methoden der drahtlosen Telegraphie. Sieht man von den beiden letzterwähnten Methoden ab, nach welchen ein Lichtstrahl zur Uebertragung der Anregung entsendet wird, und zieht bloss die rein elektrischen bezw. elektromagnetischen Methoden in den Kreis der Betrachtungen, so lassen sich drei Methoden der drahtlosen Telegraphie unterscheiden und zwar 1. die Leitungsmethoden unter Anwendung von Batterieströmen, bei welchen die Erde direkt als Leiter dient, 2. die Induktionsmethoden, bei welchen die Uebertragung durch Induktionswirkungen erfolgt, und welche sich wieder in die elektrostatischen und elektrischen Induktionsmethoden unterteilen lassen, und endlich 3. in die Wellenmethoden, bei welchen frei im Raume sich fortpflanzende elektrische Wellen die Empfangsapparate zur Anregung bringen.

Leitungsmethoden. Das älteste bekannte Patent, nach welchem die Erde als Leiter zur Uebertragung ausgenützt werden soll, wurde im Jahre 1854 an Lindsay erteilt. In demselben sind schon alle wesentlichen Punkte zur Durchführung der telegraphischen Uebertragung enthalten. Die Anwendung dieser Einrichtung wurde ursprünglich nur für die Uebertragung von Mitteilungen von einem Ufer eines Wasserlaufes zum anderen Ufer desselben in Aussicht genommen, um die Anwendung der kostspieligen Flusskabel zu vermeiden. Wie sich aus dem in Fig. 2 dargestellten Schaltungsschema ersehen lässt, ist die hierbei zur Anwendung gelangte Anordnung nahezu identisch mit der bereits von Morse (siehe Fig. 1) angegebenen. Die Batterie B, auf der einen Seite des Flussufers, steht durch eine Leitung mit dem Taster S, mit dem als Empfangsinstrument dienenden Galvanometer G und zwei in den Fluss nahe am Uferrande versenkten Erdplatten C und F in leitender Verbindung. Die ganz gleiche Anordnung ist am entgegengesetzten Ufer getroffen und ist die Batterie B′ so geschaltet, dass sie mit der Batterie B in Serie arbeitet. Die Länge der an den Ufern einander gegenüber parallel verlaufenden Leitungen ist nun so bemessen, dass der Leitungswiderstand zwischen den beiden einander gegenüberliegenden Erdplatten mehr dem Widerstand der gegenüberliegenden Leitung samt Batterie und Apparaten kleiner ist, als der Widerstand zwischen den beiden an der einen Uferseite liegenden Erdplatten, so dass, den Gesetzen der Stromverzweigung entsprechend, der grössere Teil des Stromes durch die gegenüberliegende Leitung gehen muss. Es wird sohin bei jedem Druck auf einen der beiden Taster S, S′

Digitized by Google

durch Unterbrechung des einseitigen Stromkreises in der gegenüberliegenden Leitung eine Stromschwächung eintreten, die sich durch verminderten Ausschlag der Galvanometernadel kundgibt. Die Länge der beiden Leitungen längs des Wasserlaufes wird, um das angestrebte Ziel zu erreichen, jedenfalls viel grösser sein, als die Breite desselben beträgt. Es wird daher an den Leitungen selbst nichts gespart, und gewährt diese Anordnung sohin nur den Vorteil, dass die namentlich bei starken Strömungen und felsigem Grunde des Wasserlaufes kostspieligen und sehr leicht der Zerstörung ausgesetzten Kabel vermieden werden können. Diese Methode dürfte eben nur dort anwendbar sein, wo keine anderweitigen Erdströme zu erwarten sind und wird sich auch nur auf geringe Entfernungen als wirksam erweisen.

Fig. 2.

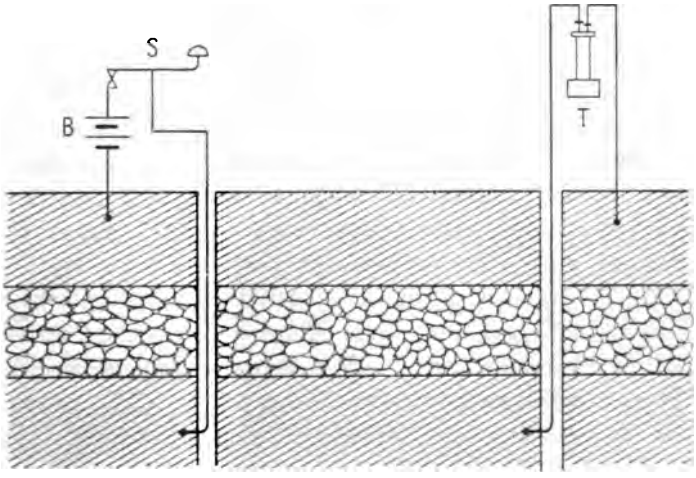


Trotz der Unzulänglichkeit der direkten Leitungsmethode, welche nebstbei sehr empfindliche Empfangsinstrumente erfordert, wurde dieselbe doch immer wieder neu aufgenommen. So berichtet Abbé L. Michel noch im Jahre 1894 in Electrical Review, Bd. 24, über einige von ihm durchgeführte Experimente, bei welchen als Elektrizitätsquelle eine Akkumulatorenbatterie B von fünf Elementen und als Empfänger ein Telephon T verwendet wurde und bei welchen er bis auf eine Entfernung von ca. 1 km noch anstandslos zu telegraphieren vermochte. Hier wurden, wie Fig. 3 zeigt, zwei ganz unterschiedene Stromwege geschaffen, indem die eine Erdverbindung innerhalb eines Brunnens so tief verlegt wird, dass sich zwischen derselben und der in die obere Erdkruste verlegten Erdleitung eine möglichst nichtleitende Materialschicht befindet, so dass eine eigentliche Stromverzweigung nur in geringem Masse stattfinden kann.

Digitized by Google

Praktische Anwendung fand die von Willoughby Smith angegebene Anordnung zum Verkehr zwischen dem Fastnetleuchtturm und der gegenüberliegenden Küste, da an eine Landung des Kabels wegen der starken Brandung nicht gedacht werden konnte. Die Verbindung wurde so hergestellt, dass von dem Leuchtturm aus zwei blanke Kupferdrähte nach entgegengesetzten Seiten über die Felsen ins Wasser geführt wurden, während vom Lande aus ein ca. 15 km langes Seekabel bis in die Nähe der Felsen verlegt ist, wo es, an einem Pilzanker befestigt, endigt. Hier wurde bereits mit Induktionsströmen grosser Spannung gearbeitet, so dass schon ein bemerkbarer Teil des Stromes zu den Empfangsplatten gelangen könnte. Würden die Kupfer-

Fig. 3.



drähte bei schlechtem Wetter von den Erdplatten abgerissen und auf die Felsen geschleudert, so genügte es, die Drähte einfach wieder in das Wasser hinabzulassen, um die telegraphische Verbindung ohne Anstand von neuem zu ermöglichen.

Unter den einfachen Leitungsmethoden ist die von Rathenau im Jahre 1894 versuchsweise auf dem Wannsee durchgeführte Anordnung zur Verständigung zwischen Ufer und Booten insofern von besonderem Interesse, als dieselbe durch die Versuche von Preece, welche auf Induktionswirkungen basiert waren und deren in der Folge eingehenderer Erwähnung geschehen soll, angeregt wurden. Das Studium dieser Versuche führte ihn zu der Annahme, dass bei denselben nebst Induktionserscheinungen in weit höherem Masse Leitungs-

Digitized by Google

erscheinungen zum Ausdruck kamen. Um sich diesbezüglich zu vergewissern und Induktionserscheinungen thunlichst auszuschliessen, wurde zum Betriebe dieser Anordnung Gleichstrom verwendet, welcher einer naheliegenden Elektrizitätszentrale entnommen wurde.

Die Thatsache, dass beim Einleiten eines Stromes in eine ausgedehnte Flüssigkeitsmenge der Ausgleich der Spannungen nicht nur in einer geraden Verbindungslinie der beiden Elektroden stattfindet, sondern dass sich die Stromlinien ähnlich wie die magnetischen Kraftlinien verbreiten, erklärt die Möglichkeit, eine Anzahl dieser Stromlinien durch einen in die Flüssigkeit gelegten Leiter aufsaugen zu lassen und dieselben zur Erregung empfindlicher Empfangsinstrumente zu benützen. Die Anzahl der Stromlinien, welche auf diese Weise vereinigt werden können, wird durch die Potentialdifferenz der nunmehr metallisch verbundenen Punkte bestimmt. Der Verlauf dieser Stromlinien erscheint in der, die Gesamtanordnung schematisch darstellenden Fig. 4 gleichfalls skizziert. Nach dieser Darstellung ergibt sich von selbst, dass die Wirkungssphäre des Stromes von zwei Faktoren, und zwar der Stromstärke und der Entfernung der beiden Stromeinleitungen in die Wassermasse abhängen wird, und dass je grösser die beiden sein werden, desto grösser auch die Entfernungen werden, auf welche sich noch eine Verständigung erzielen lässt.

In Fig. 4 bedeuten B die Elektrizitätsquelle, R einen Widerstandsregulator, U einen von einem Motor angetriebenen Stromunterbrecher, A ein Ampèremeter, T einen Telegraphentaster und E E die in das Wasser versenkten Erdplatten des primären Stromkreises, in welchen in Abzweigung das Voltmeter V eingeschaltet ist. C und D sind zwei durch ein Kabel miteinander verbundene Boote, von welchen gleichfalls zwei Erdplatten e e in das Wasser versenkt werden. Auf dem einen der Boote befindet sich das Telephon N, welches, in den sekundären Stromkreis geschaltet, als Empfänger dient. Um eine konstante Lautwirkung im Telephon zu erzielen, ist die Anordnung des Stromunterbrechers U im primären Stromkreise erforderlich, während die Zeichen durch den Taster T, welcher den Strom nach dem Morsesystem unterbricht, gegeben werden und sich als Pausen des Geräusches im Telephon kennzeichnen. Mit dieser Anordnung konnte bis auf $4\frac{1}{2}$ km gesprochen werden, doch ist Rathenau der Ansicht, dass sich diese Entfernung durch Anwendung besserer Gebe- und Empfangsapparate vervielfachen lässt.

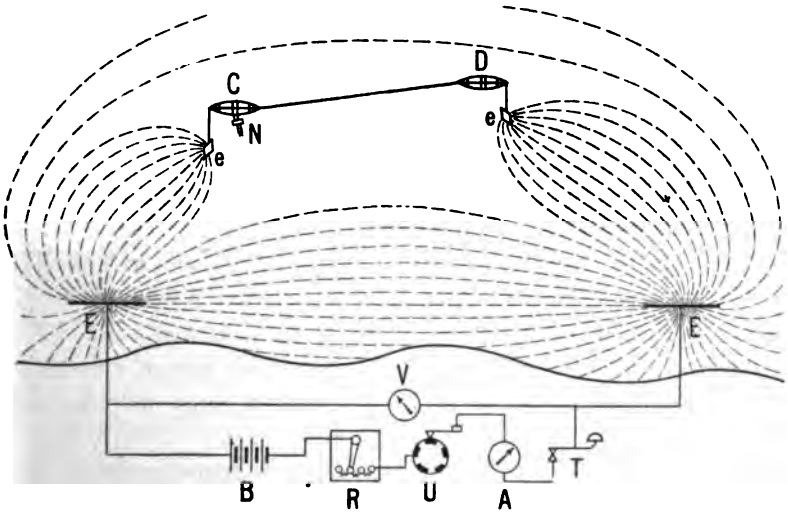
Von den bereits erwähnten Anordnungen der verschiedenen Erfinder beziehen sich die patentierten Anordnungen von Haworth,

Digitized by Google

Smith, Stevenson und Blake auf die einfache Leitungsmethode.

Induktionsmethoden. Die Einteilung der Induktionsmethoden in elektromagnetische und elektrostatische ist eigentlich nicht ganz zutreffend, indem der Unterschied zwischen selben sich nicht ganz genau feststellen lässt. Bei allen diesen Systemen spielen beide Arten der Induktion eine gewisse Rolle, nur gewinnt in dem einen Falle der eine Effekt das Uebergewicht über den anderen, während in dem anderen Falle das umgekehrte Verhältnis eintritt. Die enge Verwandtschaft zwischen statischer und elektromagnetischer Induktion wird durch die

Fig. 4.



modernen Theorien über die induktiven Wirkungen erklärbar. Nach Maxwells Theorie verursacht jede elektromotorische Kraft, welche auf ein Dielektrikum einwirkt, in demselben eine elektrische Verschiebung. Jeder Wechsel in dieser Verschiebung erzeugt nun in diesem Dielektrikum einen elektrischen Strom, welcher deshalb von ihm auch Verschiebungsstrom bezeichnet wurde. Diese Verschiebungsströme in den Dielektrika sind immer von einer magnetischen Kraft begleitet. Es wird sohin ein Feld von magnetischen Induktionslinien erzeugt, welche das stromdurchflossene Dielektrikum ebenso umgeben, wie ein stromführender Draht von magnetischen Kraftlinien umgeben ist.

Nach der Anschauung von J. J. Thomson werden in ähnlicher Weise beide Arten der Induktion durch elektrostatische Kraft-

Digitized by Google

röhren oder, wie er selbe bezeichnet, „Faraday sche Kraftröhren" hervorgerufen werden. Diese Röhren sind entweder offen oder in sich geschlossen. Die offenen Röhren, welche von einer positiven Ladung ausgehen, endigen immer in einer gleich starken negativen Ladung. Treffen nun diese Kraftröhren einen isolierten metallischen Körper, so rufen sie in selbem eine Ladung bezw., wenn sie einen geschlossenen Leiter durchschneiden, einen Induktionsstrom hervor. Das jeden elektrischen Strom bezw. jeden elektrisch geladenen Körper begleitende elektromagnetische Kraftfeld bedingt nun die Bewegung der Faraday-schen Röhren oder den Wechsel ihrer Lage oder Form. Jede Aenderung dieses elektromagnetischen Kraftfeldes wird sohin einen Induktionsstrom erzeugen bezw. den Ladungszustand der isolierten Platte im absteigenden oder ansteigenden Sinne beeinflussen.

Der Unterschied zwischen beiden Methoden beruht sohin nur auf dem Einflusse, welchen der betreffende Stromkreis auf die Induktionsspule bezw. auf den Kondensator ausübt. Bei der elektromagnetischen Induktion bildet die Einwirkung des durch den primären Stromkreis hervorgerufenen magnetischen Feldes das wichtige Element, während in den elektrostatischen Methoden dem durch den primären Strom vom Kondensator erzeugten elektrostatischen Kraftfelde die wirkende Rolle zufällt. In beiden Fällen müssen sich jedoch, um Wirkungen erzielen zu können, Aenderungen in den Kraftfeldern vollziehen.

Die Bezeichnung elektrostatische Induktion ist in diesem Falle daher eine irrtümliche, weil ja die Wirkungen doch nur durch bewegte Elektrizität hervorgerufen werden.

Das Erscheinen und Verschwinden der Induktionsröhren, welche die Ladung und Entladung eines Kondensators begleiten, sind es, welche hier die Entstehung des Induktionsstromes bedingen, und ist sonach die Wirkung in diesem Falle ebenfalls keine elektrostatische, sondern eine elektrokinetische.

Nichtsdestoweniger soll hier bei Vorführung der verschiedenen Systeme der Unterschied zwischen elektromagnetischer und elektrostatischer Induktion festgehalten werden.

Elektromagnetische Induktionsmethoden. Die schon lange erkannte und von Faraday eingehend studierte und gesetzmässig begründete Erscheinung, dass zwischen zwei in sich geschlossenen Leitern eine Wechselbeziehung in dem Sinne besteht, dass ein in dem einen Leiter entstehender oder vergehender Strom in dem anderen jedesmal einen Strom von kurzer Dauer und entgegengesetzter Richtung erregt, welche Erscheinung unter der Bezeichnung der elektro-

Digitized by Google

magnetischen Induktion gekannt ist, liess im Jahre 1884 bei Phelps die Idee entstehen, diese Erscheinung zur telegraphischen Verständigung zwischen einem fahrenden Zuge und den Eisenbahnstationen auszunützen. In Durchführung seiner Idee wurden zwei getrennte Stromkreise hergestellt, deren einer von Station zu Station verlief, der andere hingegen nur auf dem Zuge untergebracht wurde. Diese beiden Stromkreise werden zu einander so nahe als möglich geführt, um eine möglichst wirksame Induktion zu erzielen. Der von Station zu Station laufende Leiter bestand aus einem isolierten Drahte, der in eine auf den Querschwellen befestigte und mit einem Deckel versehene Rinne verlegt wurde. Den Stromkreis im Wagen bildete ein in 90 Windungen auf einen Rahmen gewickelter, isolierter Kupferdraht von ca. 2500 m Länge. Der Rahmen wurde in einer zum Geleise parallelen und lotrechten Ebene so aufgestellt, dass die unteren Windungen, welche in einem Gasrohre eingeschlossen waren, ca. 175 mm über dem isolierten Leiter zu liegen kamen. Auf diese Weise konnte durch entsprechende Anordnung der Empfangs- und Gebevorrichtung eine gegenseitige Verständigung erzielt werden. Als Empfänger diente auf dem Wagen ein empfindliches Relais in Verbindung mit einem Morseapparat im Lokalstromkreise und in den Stationen ein Telephon. Als Geber wurden Arbeitsstromtaster benützt. Die mit dieser Einrichtung auf einer ca. 20 km langen Strecke einer New Yorker Eisenbahnlinie durchgeführten Versuche sollen ganz befriedigende Ergebnisse geliefert haben.

Aehnliche Einrichtungen wurden in den Jahren 1887 und 1888 von Woods und Adler in Vorschlag gebracht und mit selben auch Versuche durchgeführt, welche ebenfalls von Erfolg begleitet gewesen sein sollen. Da aber das Bedürfnis einer gegenseitigen Verständigung zwischen den verkehrenden Zügen und den Stationen zu den seltenen Ausnahmefällen zählt, Telegramme von Passagieren hingegen mit Leichtigkeit an jedem Haltepunkte der Bahn zur Aufgabe gebracht werden können, eine derartige Einrichtung aber die Anwesenheit eines Manipulanten am Zuge erforderte, war der Betrieb im Verhältnis zum Erfolge zu teuer, weshalb die einschlägigen Versuche auch bald aufgegeben wurden.

Die Versuche von Preece. Die Herstellung einer telegraphischen Verbindung zwischen den Leuchttürmen und der Küste wurde an den verkehrsreichen Küsten Englands als Bedürfnis erkannt. Die Verbindung dieser Leuchtschiffe mit den Küsten durch Kabelleitungen begegnete jedoch bedeutenden Schwierigkeiten, weil bei den steten

Digitized by Google

Schwankungen dieser Schiffe, welche namentlich bei auftretenden Stürmen oft eine gewaltige ist, stets ein Bruch der Kabelleitung in Aussicht steht, und daher gerade in jenen Momenten, wo sich die Verständigung am notwendigsten erweist, ein Versagen derselben eintreten kann. Diese Schwierigkeiten zu vermeiden, wurden von W. H. Preece, dem bekannten Chefelektriker der englischen Postverwaltung, drei verschiedene Arten einer Kommunikation zwischen Leuchtschiffen und Küste vorgeschlagen, welche auch der Erprobung unterzogen wurden. Die erste Methode bestand darin, dass längs der Küste eine Leitung von etwa $1^1/_2$ km Länge, und am Schiffe gleichfalls eine Leitung vom Vordersteven bis zum Stern des Schiffes verlegt wurde. Ströme in der einen Leitung werden natürlich auch Ströme in der anderen Leitung induzieren, deren Stärke von der Länge der Drähte, ihrem gegenseitigen Abstande und der Stärke des primären Stromes abhängt. Nach dem zweiten Vorschlage wird eine kurze Leitung an der Flanke des Schiffes derart aufgehängt, dass die Enden desselben in der Richtung der Küstenleitung in die See tauchen und so der Strom durch das Seewasser hindurch zum Empfangsinstrumente gelangt. Als dritte Methode soll ein leichtes Seekabel, welches in einer Drahtspule endigt, vom Ufer aus bis in die Nähe des Schiffes, mit welchem selbes jedoch nicht in Berührung kommt, geführt werden. Eine zweite Spule befindet sich am Bord des Schiffes. Die beiden Spulen sollen aufeinander wirken. Hier hätten wir sonach eine Kombination der elektrostatischen und elektromagnetischen Induktionsmethode.

Diese Versuche, welche an verschiedenen Punkten der englischen Küste und nicht allein zwischen Küste und Leuchtschiffen, sondern auch zwischen den Ufern der die Küste vielfach durchbrechenden Sunde durchgeführt wurden, und bis auf 8 km Entfernung von Erfolg begleitet waren, gaben auch die Anregung, die für die Telegraphie durch den Raum auf magnet-elektrischer Induktion beruhenden Gesetze zu erforschen. Auch hier werden bereits Wellenbewegungen des Aethers als Ursache der Uebertragung angesehen, doch ist hier noch nicht angegeben, ob diese Induktionserscheinungen durch elektrische oder magnetische Beeinflussung des Aethers hervorgerufen werden. Diese Annahme scheint mit der Entstehung der sogenannten Hertzschen Wellen einigermassen im Widerspruch zu stehen, da letztere ihre Entstehung raschen elektrischen Oscillationen verdanken und die Entstehung von Wellen nach der allgemeinen Annahme nur plötzlichen Impulsen oder Störungen des betreffenden umgebenden Mediums zuzuschreiben ist. Wenn nun auch bei den Induktionserscheinungen gleich-

Digitized by Google

falls plötzliche Impulse zu Tage treten, so sind selbst bei hoher Frequenz solcher Ströme, als welche doch nur Wechselströme in Betracht kommen können, die Zahl der für die Zeiteinheit in Betracht kommenden Impulse viel zu gering, um die Entstehung von elektrischen Wellen, welche bis zu Millionen von Impulsen in der Sekunde bedingen, hier als wahrscheinlich anzunehmen. Es ist vielmehr viel näher liegend, die Aenderungen des jeden stromdurchflossenen Leiter umgebenden magnetischen Kraftfeldes, wie solches durch das Entstehen, Anschwellen und Verschwinden von Strömen positiver und negativer Richtung hervorgerufen wird, als Grundursache der Induktionserscheinungen zu bezeichnen. Die von dem stromdurchflossenen Leiter ausgehenden, sich radial im Raume verbreitenden magnetischen Kraftlinien schneiden den weit entfernten metallischen Leiter und rufen in demselben bei jeder Veränderung von deren Intensität, die der allgemeinen Annahme nach nur in der Verringerung oder Vermehrung der Anzahl derselben gelegen ist, die als solche bezeichneten Induktionsströme hervor. Hierfür spricht auch die aus Erfahrung gewonnene Thatsache, dass die Entfernung, auf welche mittels Hertzscher Wellen noch Nachrichten vermittelt werden können, eine vielfach grössere ist, als jene, welche auf dem Wege der elektromagnetischen Induktion erreicht werden konnte, trotzdem dass die für die ersteren aufgewandte elektromotorische Kraft eine relativ viel geringere sein kann. Wenn dessenungeachtet im nachstehenden die von Preece gezogenen Schlussfolgerungen als massgebend angenommen werden, so liegt insoferne keine Inkonsequenz darin, als ja die Ergebnisse mit den praktischen Erfahrungen übereinstimmen und nur bezüglich der das Ergebnis beeinflussenden Grundursachen die Anschauungen differieren. Es ergibt sich aus den angeführten drei Methoden, welche von Preece in Vorschlag gebracht wurden, von selbst, dass zur Ausführung des Signalisierens bezw. Telegraphierens durch den Raum ein Primärleiter erforderlich ist, in welchem Schwingungen oder elektrische Wechselströme in beliebiger Weise erregt werden können. Diese Wechselströme müssen in einer für unser Gehör angenehmen und markanten Weise abwechseln, wofür etwa 260 Wechsel pro Sekunde erforderlich sind. Der Primärstromkreis muss frei im Aether ausgelegt werden, und darf der Sekundärstromkreis, den man zu erregen wünscht, nicht durch leitungsunfähige oder magnetische Materie vom Primärstromkreis abgeschieden sein.

Bei den zahlreichen von Preece im Jahre 1893 im Ufersande der Seebucht zu Conway und später zu Frodsham und anderen Orten angestellten Versuchen wurden aus isolierten Drähten Quadrate und

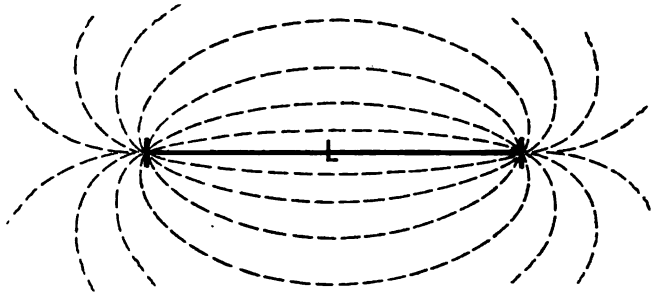
Digitized by Google

Rechtecke gebildet, und die Einwirkung veränderlicher Ströme im Primärleiter auf den entfernten Sekundärleiter mittels Spiegelgalvanometer und Telephon in genauester Weise bestimmt, um für die günstigste gegenseitige Anordnung der beiden Leiter, die erforderlichen Anhaltspunkte zu gewinnen. Zur Erzeugung der veränderlichen primären Ströme wurde eine Wechselstrommaschine verwendet, welche bei 192 vollen Wechseln in der Sekunde einen Strom von 15 A bei 150 Volt ergab.

Die allgemeinen Ergebnisse, welche bei diesen Versuchen erzielt wurden, und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen seien im folgenden kurz zusammengefasst:

1. Die Erde wirkt, wenn selbe zum Schlusse des Stromkreises als Verbindungsglied benützt wird, einfach als Leiter. Da die Erde als Leitungsmaterial an und für sich einen sehr grossen Widerstand

Fig. 5.



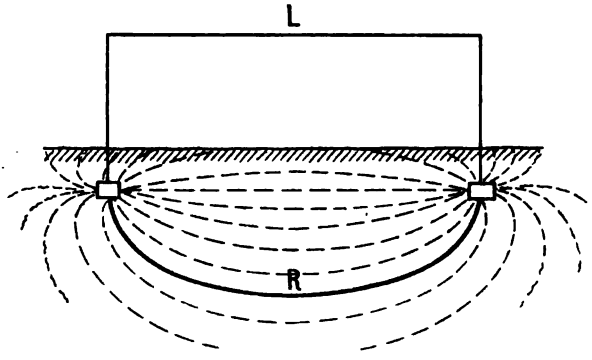
hat, muss die als Rückleitung eines Stromkreises dienende Erdmasse sehr gross sein. Wäre das als Erdleitung dienende Material, gleich der Wassermasse des Meeres, homogen, so würde der zwischen den Erdplatten fliessende Strom unzähligen, aber bestimmten Stromlinien folgen, die in ihrem Verlaufe, wie die Diagramme Fig. 5 (Horizontalansicht) und Fig. 6 (Vertikaldurchschnitt des Erdbodens) zeigen, ein Hämisphäroid bilden. Mit Erdplatten in 1000 m Abstand sind diese Ströme an der Erdoberfläche bis auf 800 m Entfernung hinter jeder Platte nachgewiesen worden. In der Querrichtung, rechtwinkelig zur Verbindungslinie der beiden Erdplatten, zeigten sich ähnliche Ausdehnungen der Stromlinien.

Diese hämisphäroidale Masse lässt sich in elektrischer Beziehung durch einen resultierenden Leiter R (Fig. 6) ersetzt denken. Um nun die gegenseitige induktive Wirkung zwischen zwei mit Erdrückleitung versehenen Stromkreisen beurteilen zu können, ist es notwendig, die

Digitized by Google

Lage dieses imaginären Leiters abzuschätzen. Wenn der Erdboden von verschiedenartiger Beschaffenheit und trocken ist, wird das Hämisphäroid eine sehr verzerrte Form annehmen, das Prinzip bleibt sich jedoch das gleiche und eine resultierende Rückleitung kann ebensogut angenommen werden. Im allgemeinen ist bei den Versuchen zu Frodsham nachgewiesen worden, dass die resultierende Erdleitung bis auf etwa 100 m Tiefe hinabging, wobei die Primärleitung eine Länge von 100 m hatte. Bei den Versuchen zu Conway, bei welchen die Primärleitung 410 m Länge hatte, wurde diese Tiefe mit 116 m berechnet. Am Ness-See und Kilbrannan-Sund, wo der Abstand der parallelen Leitungen zwischen 3,3 bis 6,5 km variierte, berechnete sich die Tiefe, bis zu welcher die Stromlinien hinabgingen, bis auf etwa

Fig. 6.



300 m. Hieraus folgt, dass die Tiefe, bis zu welcher die Resultante der Stromlinie in den Erdboden hinabgeht, mit der Entfernung der Erdplatten wächst. Hierdurch wird es auch möglich gemacht, die telegraphische Uebermittelung durch Induktion von parallelen Drähten auf viel grössere Entfernungen durchzuführen, als es sonst möglich sein würde.

2. Bei diesen Versuchen wurden auch zwei Drahtspulen als Primär- und Sekundärspulen einander gegenübergestellt, und die im Sekundärkreis entstehenden induzierten Ströme mittels Telephon nachgewiesen. Hierbei zeigte sich, dass das Kraftfeld einer Spule sich mit der Vergrösserung des Durchmessers dieser Spule viel weiter ausdehnt, als mit Vermehrung der darauf befindlichen Windungen, sohin die Entfernung, über welche gesprochen werden kann, durch Vergrösserung des Spulendurchmessers sich viel mehr erhöht als durch Vermehrung

Digitized by Google

von deren Windungsanzahl. Da nun ein einfacher, über die Erdoberfläche ausgespannter Draht, der durch Vermittelung der Erde einen vollständigen Stromkreis bildet, als Spule mit einfacher Windung, aber grossem Durchmesser angesehen werden kann, deren unterer Teil eben die rückleitende Resultante der Erdströme bildet, wird ein solcher Draht wirksamer sein, als eine Spule. Die Entfernung, bis auf welche sich der Einfluss der Wirksamkeit eines solchen Drahtes erstreckt, ist abhängig von der Höhe des Drahtes über dem Erdboden und von der Tiefe, bis zu welcher die Erdresultante in den Boden hinabgeht.

3. Bezüglich der Ausführung der telegraphischen Verbindung mittels Induktion sind drei Anordnungen möglich und zwar: a) einfache parallele Drähte mit Erdschluss an beiden Enden; b) parallele Spulen mit einer oder mehreren Windungen und c) horizontale, in einer Ebene angeordnete Spulen mit einer oder mehreren Windungen.

Die besten praktischen Resultate werden mit der ersten Anordnung erhalten, und zwar besonders wenn die Gestaltung des Erdbodens gestattet, dass die Drähte in beträchtlicher Höhe über dem Meeresspiegel geführt werden, während die Platten sich im Meeresniveau befinden. Durch Anwendung dieser Anordnung wird die Ausdehnung der Spulen praktisch vergrössert und hierdurch auch die Entfernung, bis auf welche solche Primär- und Sekundärdrähte noch wahrnehmbar gegenseitig aufeinander induktiv einwirken. Es gelangt eben bei dieser Anordnung sowohl die elektromagnetische als auch die elektrostatische Induktion zur vollen Wirkung, wobei auch die Erdströme durch die Ausbreitung im Erdboden unterstützend zu wirken scheinen. Da bei in sich geschlossenen Spulen nur rein elektromagnetische Wirkungen zur Ausnützung gelangen können, erklären sich die Vorteile der ersten Anordnung von selbst. Um dies praktisch zu konstatieren, wurden zwei Drähte von bestimmter Länge in zwei Spulen gewunden, um metallische Stromkreise herzustellen und auf diese Weise die Versuche der gegenseitigen Verständigung bis zu jener Grenze durchgeführt, auf welcher eine solche nicht mehr möglich wurde. Hierauf wurden diese Spulen abgewickelt und als gerade Leitungen hergestellt, für welche die Erde als Rückleiter diente: Die induktiven Wirkungen und sohin auch die Entfernungen, innerhalb welcher sich diese Wirkungen bemerkbar machten, waren in dem letzteren Falle vielmal grösser, als bei der ersten Anordnung.

4. Das allgemeine Gesetz, welches die Entfernungen, über welche man sprechen kann, bestimmt, ist noch nicht gelungen, festzulegen, und ist auch Preece der Ansicht, dass sich ein solches Gesetz kaum

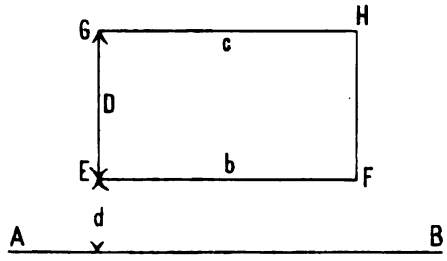
Digitized by Google

aufstellen lässt, weil zu viele störende Elemente, sowohl geologische als elektrische, vorhanden sind, welche die Gesetzmässigkeit verschleiern. In der Praxis hat man es eben mit zwei Stromkreisen von unbekannter Form zu thun, wofür die Thatsache spricht, dass in einigen Gegenden genaue und übereinstimmende Resultate erzielt wurden, wogegen in anderen Gegenden die Resultate sich als widersprechend erwiesen.

Trotzdem dass die hierbei in Betracht kommenden Verhältnisse eine genaue mathematische Behandlung nicht zulassen, hat es Preece dennoch unternommen, einige Formeln aufzustellen, die doch wenigstens annähernde Schlüsse zu ziehen gestatten.

Sei in Fig. 7 A B ein unendlich langer Draht und b, c zwei Drähte, welche die parallelen Seiten eines rechteckförmigen Stromkreises E, F, G, H bilden, so wird ein in A B erregter Strom, dessen Kraftlinien die Drähte E, F und G, H durchschneiden, in dem ge-

Fig. 7.



schlossenen Stromkreis E, F, G, H einen momentanen Strom hervorrufen, in welchem die induzierte Elektrizitätsmenge $Q = K \log \frac{D+d}{d}$ beträgt. K ist hierbei eine Konstante, welche von der Länge der Seiten G H und E F des Rechteckes (in Centimetern), der Stromstärke (in Ampère) im Drahte A B und vom Gesamtwiderstande (in Ohm) des Rechteckes abhängig ist, d bezeichnet den Abstand zwischen der Linie A B und der unteren Seite des Rechteckes, während D die Höhe des Rechteckes darstellt.

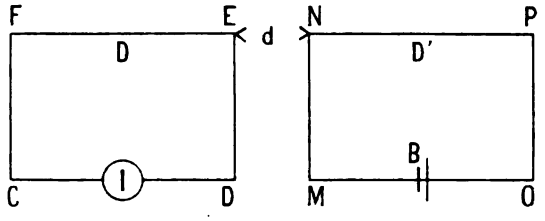
Innerhalb gewisser Grenzen ist diese Formel auch dann angenähert richtig, wenn A B nicht unendlich lang ist, sondern eine Seite eines zweiten Rechteckes bildet, das dem der Induktion unterworfenen Rechtecke ähnlich ist und mit demselben entweder in derselben Ebene liegt oder zu demselben senkrecht gerichtet ist. Die Formel muss jedoch, um der zweiten Seite des induzierenden Rechteckes Rechnung

Digitized by Google

zu tragen, entsprechend der Lage desselben für jeden einzelnen Fall abgeändert werden.

Liegen die beiden Rechtecke, wie in Fig. 8 dargestellt, in derselben Ebene, so wird die Gesamtwirkung der beiden Seiten M N und

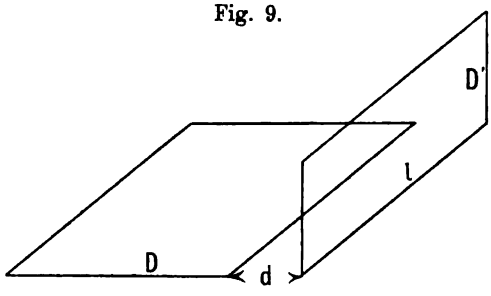
Fig. 8.



O P des induzierenden Stromkreises auf den induzierten Stromkreis dargestellt durch die Formel $Q = K \left\{ \log \frac{D+d}{d} - \log \frac{D^1+d+D}{D^1+d} \right\}$.

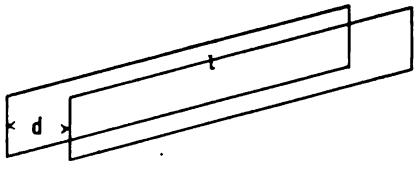
Stehen dagegen die Ebenen der beiden Rechtecke rechtwinkelig

Fig. 9.



zu einander (Fig. 9) und ist die Seite l im Vergleiche zu D sehr gross, dann gilt die Formel $Q = K \left\{ \log \frac{D+d}{d} - \frac{1}{2} \log \frac{D_1^2+(D+d)^2}{D_1^2+d^2} \right\}$.

Fig. 10.



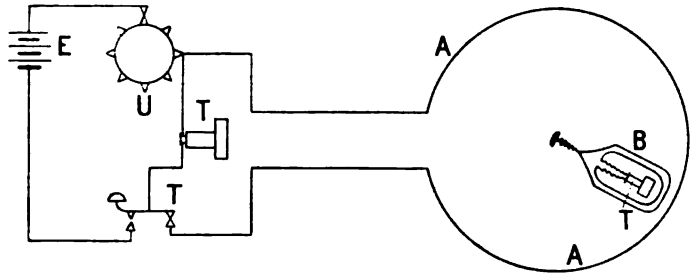
Sind ferner die beiden Rechtecke parallel und gleich (Fig. 10) und ist l im Vergleich zu D sehr gross, dann ist $Q = K \left(\log \left[\frac{D^2}{d^2} + 1 \right] \right)$.

Digitized by Google

In diesen Formeln erscheinen nur die Wirkungen auf jene Drähte des Sekundärkreises berücksichtigt, welche den Drähten des Primärkreises parallel sind, die Wirkungen der rechtwinkelig stehenden Drähte dagegen vernachlässigt. Die letzteren, allerdings viel geringeren Wirkungen stellen sich den in den parallelen Drähten induzierten Hauptströmen entgegen, so dass sich in der Praxis diese Ströme mit der Entfernung rascher abschwächen, als dies nach dem logarithmischen Gesetze der Fall sein würde.

Die englischen Patente von Evershed und Sennet beziehen sich auf die Signalisierung zwischen dem Ufer und Leucht- oder herannahenden Schiffen. Die von Sydney Evershed vorgeschlagene Anordnung, welche zur Verständigung zwischen Ufer und Leuchtschiff dient, geht von der Annahme aus, dass ein an einem Pilzanker liegendes Leuchtschiff B (Fig. 11) infolge der wechselnden Windrichtung

Fig. 11.



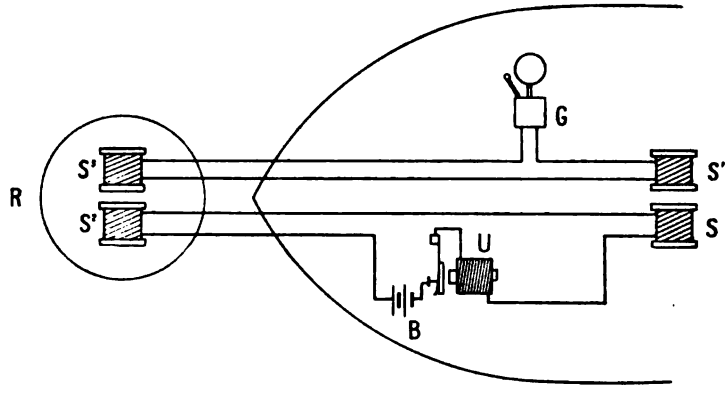
verschiedene Lagen innerhalb eines kreisförmigen Feldes einnehmen wird, und in jeder dieser Lagen im stande sein muss, Nachrichten zu empfangen. Um dieses kreisförmige Feld ist auf den Meeresboden ein Kabelring A gelegt, der mit der Küste verbunden ist. Auf dem Schiffe ist eine, aus mindestens 50 Windungen isolierten Drahtes bestehende Sekundärspule von möglichst geringem Widerstande untergebracht. Besteht das Schiff hauptsächlich aus Eisen, so wird diese Spule rund um die Aussenseite des Bollwerkes anzuordnen sein, wobei deren magnetische Achse mit der Längsachse des Schiffes womöglich zusammenfallen soll. Mittels des Tasters T und des automatischen Stromunterbrechers U, der den Strom einige tausend Male in der Minute unterbricht, werden durch den Kabelring intermittierende Ströme hindurchgesandt. Die Stromstösse in dem Kabelring A erzeugen in der Sekundärspule rasch wechselnde elektromotorische Kräfte und es gehen durch das Telephon T Wechselströme, welche die Membrane

Digitized by Google

desselben in Bewegung versetzen. Zur Zeichengebung wird das Morsealphabet benützt. Die Schwierigkeiten, welche beim Telegraphieren mittels Induktion der Anruf bietet, sucht Evershed durch ein sehr sinnreiches Relais zu beseitigen, welches auf Hervorrufung von Eigenschwingungen eines abgestimmten Metallrechteckes durch rhythmische Stromimpulse basiert.

In dem deutschen Patente von Somzee wird eine Anordnung beschrieben, welche auf dem Prinzipe der Hughesschen Induktionswage beruht. Bei dieser Methode ist die Induktionswage aus zwei Stromkreisen gebildet, in deren jedem ein Paar von Spulen eingeschaltet ist. Der eine dieser Stromkreise wird durch eine Batterie B (Fig. 12) und einen automatischen Stromunterbrecher U, der andere

Fig. 12.



durch eine Glocke G ergänzt. Ein Paar dieser Spulen, S, S^1, ist auf dem Schiffe untergebracht, während das andere Paar, S^2, S^3, sich auf einem Schwimmer R, welcher von dem Schiffe geschleppt wird, befindet. Die induktive Wirkung von S auf S^1 ist normal durch die Wirkung von S^2 und S^3 aufgehoben oder ausgeglichen. Nähert sich jedoch das Schiff einer, durch eine grosse Metallboje markierten Untiefe, so wird durch die Metallmassen derselben das Gleichgewicht der in den Spulen S^1 und S^3 induzierten Ströme gestört, der eine erhält über den anderen das Uebergewicht und die Glocke ertönt, so die drohende Gefahr anzeigend. Diese Methode von Somzee wurde im Jahre 1895 von Huskinson zur automatischen Entzündung von in einem Hafen oder sonstwo versenkter Seeminen vorgeschlagen. In diesem Falle befindet sich das eine Spulenpaar am Ufer, das andere Spulenpaar oder die Induktionswage ist hingegen mit der Mine ver-

Digitized by Google

bunden. Fährt nun ein Schiff über die Mine, so stört es durch seine Eisenmassen das Stromgleichgewicht und die Mine explodiert.

Nach den Anschauungen von Bissing beruhen die hier beschriebenen Methoden der drahtlosen Telegraphie bezw. Signalisierung auf wechselseitiger Induktion. Der durch den signalisierenden Stromkreis hindurchgehende Strom erzeugt ein magnetisches Kraftfeld, dessen Kraftlinien den Empfangsstromkreis durchdringen. Ein Wechsel der Stromintensität des Gebestromkreises ruft gleichermassen einen korrespondierenden Wechsel des magnetischen Feldes hervor, und gibt hierdurch den Anlass zur Entstehung eines induzierten Stromes in dem Empfangsstromkreise, dessen E.M.K. durch den Grad der Schwächung der magnetischen Induktion in selbem gemessen wird. Dies gibt nun als Ausdruck für die zu irgend einem Zeitpunkt bestehende elektromotorische Kraft die Gleichung $E = -M\frac{di}{dt}$, in welcher M den Koëffizienten der wechselseitigen Induktion der zwei Stromkreise und i die Stromstärke in dem induzierenden Stromkreise an irgend einem Zeitpunkte t ist.

Durchläuft den primären Stromkreis ein Wechselstrom, dessen Gleichung $i = J \sin \alpha$ ist, wobei J den Maximalwert des primären Stromkreises bedeutet, so haben wir als Wert der induzierten E.M.K. $E = M J \cos \alpha \frac{d\alpha}{dt}$ für einen bestimmten Zeitpunkt.

Die wirkliche induzierte E.M.K. im Sekundärstromkreise ist sonach durch die Gleichung $E^1 = 2\pi f M J^1$ ausgedrückt, wobei J^1 die wirkliche primäre Stromstärke und f die Frequenz der primären Stromwellen bedeutet.

Aus dieser Gleichung folgt, dass, um diese Methode der drahtlosen Telegraphie so empfindlich als möglich zu machen, in dem Signalisierungsstromkreise kräftige Ströme hoher Frequenz angewendet werden müssen, in den Induktionsspulen sehr zahlreiche Windungen anzubringen sind und zur Erhöhung der Permeabilität des intervenierenden Mediums magnetische Materialien in selbes eingeführt werden sollen.

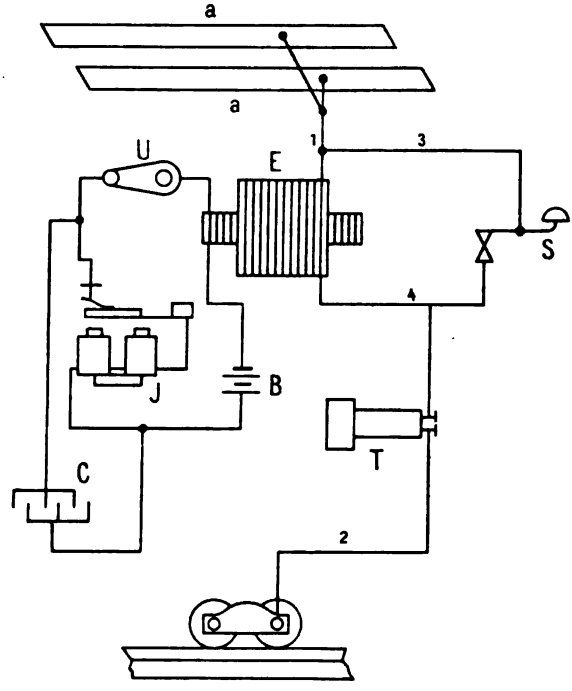
Elektrostatische Induktionsmethoden. Diese Methoden gelangten ursprünglich nur für die Verständigung zwischen einem Eisenbahnzuge und den Stationen zur Anwendung. Schon 1881 beantragte Smith, längs der Bahntrace eine Telegraphenleitung derart zu legen, dass sie sich den Wagendächern möglichst nähert. Die Dächer der Wagen oder eines Wagens sollen mit einem vollkommen isolierten Metallbelag überkleidet und von diesem Metallbelag ein Draht

Digitized by Google

zu einem im Inneren des Wagens befindlichen Telephon geführt werden, von dessen zweiter Zuführung die Leitung durch die Wagenräder zur Erde geleitet wird. Bei einem telephonischen Gespräche über diese Leitung wird das isolierte Dach, da in diesem Falle das Dach und die Leitung die Belege eines Kondensators darstellen, statisch induziert und hierdurch in dem Telephon ein Strom entstehen, so dass die Gespräche vom Wagen aus abgehört werden können.

Edison (Patent vom Jahre 1885) befestigte auf dem Wagen-

Fig. 13.



dache zwei entsprechend isolierte Metallplatten a a (Fig. 13), von welchem eine Leitung zu der sekundären Windung der Induktionsspule führt. Das zweite Ende dieser Induktionsspule führt zu dem Empfangstelephon T und von diesem, wie schematisch dargestellt, zu den Wagenrädern. Diese Sekundärspule ist jedoch durch die von den mit 1 und 2 bezeichneten Leitungsteilen abzweigenden Drähte 3 und 4 und den normal in Ruhelage befindlichen Taster S kurz geschlossen, so dass für den Empfang von Nachrichten der in a a induzierte Strom diese Spule nicht durchlauft. In den die Primärspule des Induktoriums

Digitized by Google

einschliessenden Stromkreis ist die Stromquelle B, der selbstthätig wirkende Stromunterbrecher J und ein Umschalter U eingeschaltet. Der in Abzweigung von dem Primärstromkreis verbundene Kondensator C hat den Zweck, das Entstehen von Unterbrechungsfunken am Unterbrecher J zu verhindern. Die beiden Metallplatten a a gleiten ebenso, wie vorhin angegeben wurde, längs einer Telegraphenleitung in möglichst geringem Abstande von derselben und werden durch statische Induktion geladen. Der durch die Ladungsänderungen abfliessende Strom ruft in dem Telephon in bekannter Weise die Signale hervor. Für den Empfang von Signalen ist der Umschalter U abgestellt, sohin der Primärstromkreis unterbrochen, und befindet sich der Taster S in Ruhe, hierdurch die Sekundärspule kurz schliessend. Für die Abgabe wird durch Einstellen des Umschalters U der Stromkreis der Batterie B geschlossen, der Unterbrecher J gelangt zur Wirkung und werden nunmehr die in der Sekundärspule induzierten Ströme durch den Taster S, ähnlich wie bei der Morsekorrespondenz, in die Platten a a entsendet oder kurz geschlossen. In den stabilen Stationen sind ganz ähnliche Einrichtungen vorgesehen, so dass eine gegenseitige Verständigung ermöglicht wird. Eine derartige, nur wenig modifizierte Einrichtung wurde im Jahre 1889 auf den Linien der Lehigh Valley Railroad und zwar auf einer Leitung von 86 km Länge erprobt, und soll die Uebermittelung der Telegramme während der Fahrt des Zuges ohne jede Verzögerung stattgefunden haben. Zum Betriebe sollen zwölf kleine Elemente vollkommen ausreichen, da selbst mit zwei Elementen noch vollkommen deutliche Verständigung möglich war. Bei diesen Versuchen war das Wagendach mit Metall gedeckt. Die Spulenwiderstände waren wie folgt bemessen: Primärspule des Induktoriums 3,5 Ohm, Sekundärspule 250 Ohm, Telephonspule 1000 Ohm. Nach Phelps soll sich bei einem Widerstande der Telephonspule von 10000 Ohm noch keine Abschwächung des Tones ergeben haben. Die Kosten der Einrichtung wurden für die Leitung mit 130 Mark für das Kilometer und für jede Stationseinrichtung mit 60 Mark beziffert.

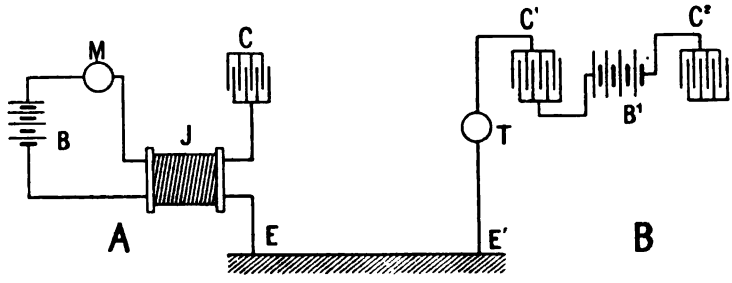
Nach den vorher angegebenen statischen Induktionsmethoden ist die Entfernung zwischen den beiden Kondensatorbelegen eine geringe, dagegen lässt sich die Distanz, bis auf welche noch eine Verständigung zu erzielen ist, durch Anwendung kräftiger Batterien und kräftiger Induktorien ziemlich weit hinausrücken. Im engeren Sinne des Wortes kann diese Art der Telegraphie doch nicht als drahtlose Telegraphie bezeichnet werden, da für die ganze Länge des Verständigungsweges eine Drahtleitung erforderlich ist.

Digitized by Google

Nach der Anordnung von Dolbear ist man nun bereits in der Lage, grössere Entfernungen ohne Anwendung eines Verbindungsgliedes in Form von metallischen Leitern zu überwinden. In Fig. 14, welche eine schematische Uebersicht über dessen Einrichtung gewährt, ist mit A der Uebertragungsstromkreis, mit B der Empfangsstromkreis bezeichnet. Die Induktionsspule J besteht bloss aus einer Reihe fortlaufender Drahtwindungen, welche die primäre und sekundäre Wickelung vereinigen. Eine Windung dieser Spule ist aufgeschnitten und die so gewonnenen vier Enden dieser Spule sind mit der Batterie B, dem Mikrophonübertrager M, dem einen Belag des Kondensators C und der Erde verbunden.

Die Batterie besteht aus einer grossen Anzahl in Reihe geschalteter Zellen, um zwischen Kondensator C und der Erde eine Potentialdifferenz von mindestens 100 Volt zu erzielen. In der Empfangsstation B

Fig. 14.

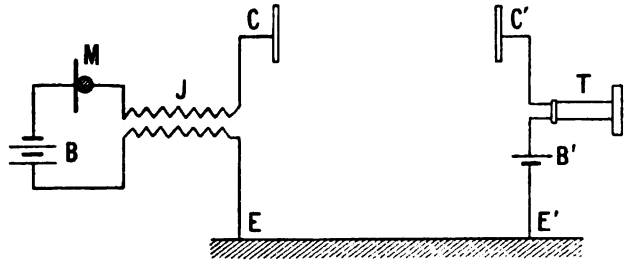


befindet sich ein Telephonempfänger T, der mit der Erde E^1 und einem Belage des Kondensators C^1 leitend verbunden ist. Der zweite Belag des Kondensators C^1 ist mit einem Pole der Batterie B^1 und durch diese mit einem Belage des Kondensators C^2 in Verbindung. Diese Anordnung verfolgt den Zweck, die Erde bei E^1 mit dem entgegengesetzten Potentiale wie bei E zu laden. Da jedoch die Kondensatoren C^1, C^2 nur eine sehr geringe Kapazität haben, so ist deren Wirkung eine sehr geringe und werden deshalb vom Erfinder als nicht wesentlich bezeichnet. Um die Vorgänge, welche sich abspielen, wenn der Widerstand des Mikrophons M bei raschen Schwingungen von dessen Membrane Aenderungen unterworfen wird, leichter erklären zu können, ist in Fig. 15 die ganze Anordnung unter Hinweglassung aller unwesentlichen Teile in einfacherer und übersichtlicherer Weise dargestellt. In diesem Falle stellt J die Induktionsspule dar und bilden C und C^1 die Beläge eines Kondensators von geringer Kapazität. Da

Digitized by Google

jedoch diese Kondensatorplatten nahe zur Erde sind, bildet jede derselben einen zweiten vollständigen Kondensator, als dessen zweiter Belag die Erde zu betrachten ist. Die Kapazität dieser Kondensatoren ist wesentlich grösser als die Kapazität des Kondensators CC^1, weil die Kapazität eines Kondensators im umgekehrten Verhältnis zur Entfernung der Platten steht und die Entfernung zwischen C bezw. C^1 und Erde wesentlich geringer ist, als die Entfernung zwischen C und C^1. Betrachtet man den Stromkreis E, J, B, M, J, C, C^1, T, B^1, E^1, E, in welchem eine veränderliche E.M.K. durch die Schwingungen von M erzeugt wird, so zeigen sich figürlich zwei Stromwege. Der eine beginnt bei B, geht über den Uebertrager M durch die eine Spule von J zu C zur Erde und von da über die zweite Spule von J zu B zurück. Der zweite Stromkreis verläuft, gleichfalls von B ausgehend, über M, erste Spule von J, C, C^1, T, B^1, E^1, E durch die zweite Spule von

Fig. 15.



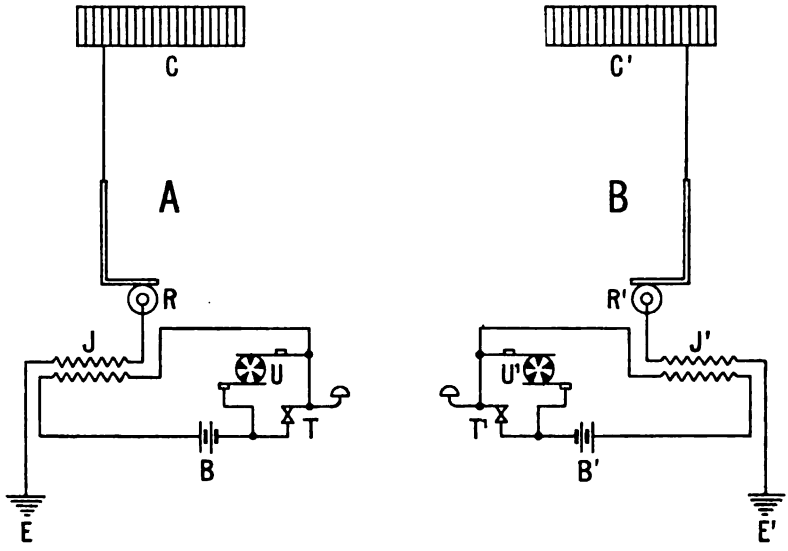
J zu B zurück. Dieser letztere Stromkreis dient zur Uebertragung der im Sender M hervorgerufenen Zeichen nach dem Empfänger T. Ist nun der Widerstand die Selbstinduktion und die Kapazität eines jeden dieser Stromwege, ferner der Betrag der Ausgabe an E.M.K. durch die Batterie und die Variation im Widerstande von M bekannt, so kann die Stromstärke in jedem dieser Stromkreise berechnet werden. Es ergibt sich aber sofort, dass nur ein ganz geringer Teil des im Lokalstromkreise B, C, E, B zirkulierenden Stromes zur Wirkung gelangen kann. Die mit B in Serie verbundene Batterie B^1 erhöht die gesamte E.M.K. in dem gesamten Stromkreise und wird sohin einen Wechsel im Widerstande M, den Strom, welcher durch T geht, verstärken.

Die von Edison für die gleichen Zwecke angewendeten Apparate und deren Verbindung lassen sich aus der Darstellung Fig. 16 ersehen. Hier sind zwei Kapazitätsflächen C, C^1 in beträchtlicher Höhe über

Digitized by Google

dem Bodenniveau vorgesehen, welche durch Drähte mit den Empfängern und der Sekundärwickelung der Induktionsspule in Verbindung stehen. Der Empfangsapparat, „Elektromotograph" genannt, besteht aus einem rotierenden Kalkcylinder, auf welchem eine Metallbürste aufliegt, die durch die entstehende Reibung einen Ton von bestimmter Höhe gibt. Bei Durchgang des elektrischen Stromes über die Bürste durch den Kalkcylinder ändert sich jedoch die Stärke der Reibung und es wird ein Ton anderer Höhe erzeugt. Dieser Wechsel im Tone dient zur Unterscheidung der einlangenden Zeichen. An Stelle dieses Empfängers, in der Figur mit R bezeichnet, kann jeder auf Wechselströme an-

Fig. 16.



sprechende Empfangsapparat angewendet werden. Ein rotierender Stromunterbrecher U bezw. U^1, welcher normal durch den Taster T bezw. T^1 kurz geschlossen ist, steht in Verbindung mit der Primärspule des Induktoriums. Wird der Taster niedergedrückt, so entsteht in der Primärspule eine Reihe rasch aufeinander folgender Stromimpulse, und werden dementsprechend korrespondierende Wechselströme in der Sekundärspule hervorgerufen, die sich auf den Flächen des erhöhten Kondensators ausbreiten, sohin den Kondensator laden, entladen, im entgegengesetzten Sinne laden u. s. f. Diese elektrostatischen Impulse werden nun auf dem Wege der statischen Induktion auf den Kondensator des Objektes, mit welchem man sprechen will, übertragen

Digitized by Google

und machen sich in dem Empfänger bemerkbar. Die zwischen den beiden Kondensatorplatten liegende Luft bildet das Dielektrikum des so entstandenen Kondensators und haben wir sohin hier wieder den Fall eines Stromkreises, welcher Widerstand, Selbstinduktion und Kapazität in Serie enthält, und bei welchem der Wechselstrom durch eine Reihe von Impulsen relativ niedriger Frequenz erzeugt wird. Es sei hierbei darauf hingewiesen, dass Edison einer der ersten war, welcher die Vorteile der Erhöhung des Kondensators erkannt hat und bereits in seinem Patente auf die Notwendigkeit aufmerksam machte, für die Telegraphie über Land die Kondensatorflächen so hoch anzubringen, dass die absorbierenden Einflüsse von Häusern, Bäumen und Terrainerhebungen auf das geringste erreichbare Mass herabgedrückt werden.

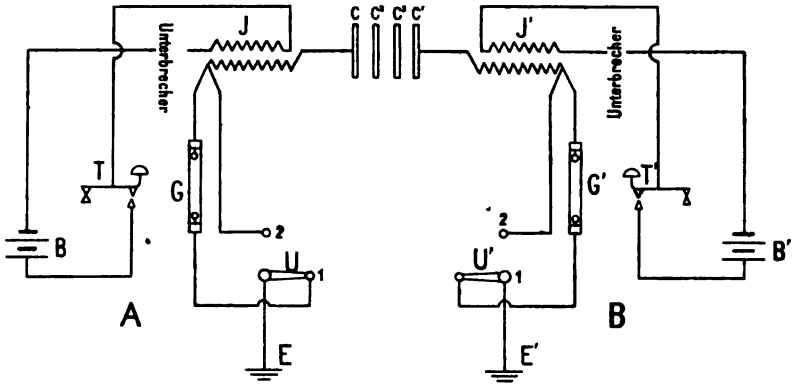
Kitsee, dessen Patent das letzte in der Serie jener Patente bildet, welche auf der elektrostatischen Induktion beruhen, schuf eine Einrichtung, welche in manchen Beziehungen der von Edison gegebenen Anordnung ähnelt. Er verwendet jedoch als Empfangsinstrument eine Geisslersche oder Vakuumröhre, durch welche bei Schliessen des Tasters und hierdurch bedingtes Entsenden eines Stromes seitens der Gebestation in der Empfangsstation eine Reihe von Entladungen hindurchgeht. Diese Entladungen versetzen, solange der Taster niedergedrückt bleibt, die Röhre in kontinuierliches Glühen. Dies gestattet wieder die Anwendung eines Linien- und Punktsystems für die Telegraphie und gewährt noch weiters den Vorteil, durch das leicht wahrnehmbare Leuchten dieser Röhre in auffallender Weise darauf aufmerksam zu machen, dass eine Verständigung gewünscht wird. Fig. 17 bringt diese auf Grund des Vorhergehenden ohne weiteres verständliche Anordnung zur Anschauung. J bezeichnet den Induktor, dessen Primärwindung mit dem Taster T der Batterie B und einem hier nicht gezeichneten Unterbrecher in Verbindung steht. Die Stromverbindung ist hier normal, d. h. im Ruhezustande durch den Taster T unterbrochen und wird der Stromkreis erst bei Niederdrücken des Tasters geschlossen, so dass hier im Gegensatze zu den vorhin beschriebenen Methoden ein Arbeitsstromsystem vorliegt. Die Sekundärspule des Induktoriums ist einerseits mit der Geisslerschen Röhre G und in Abzweigung mit dem Punkt 2 des Umschalters U, andererseits mit dem Kondensator C verbunden. Von der Vakuumröhre geht der Draht zum Punkt 1 des Umschalters und von da weiter über den Umschalter von dessen Drehpunkt zur Erde. Steht der Umschalter auf 1, so ist die Einrichtung zum Empfange, bei Stellen auf Punkt 2 zum

Digitized by Google

Geben einer Depesche bereit, für welchen Fall die Röhre ausgeschaltet wird. Zur Vergrösserung der Entfernungen, über welche eine Nachricht vermittelt werden soll, können, wie dies durch C^2 und C^3 angedeutet ist, zwischen die Platten C, C^1 gleichartige Platten, jedoch ohne jedwede leitende Verbindung, eingelegt werden, die in diesem Falle als statische Uebertrager wirken. Allerdings kann durch diese Uebertrager die Entfernung nicht bis in das Unendliche vergrössert werden, weil ja durch jede Kraftübertragung Energieverluste entstehen, sohin auch diese Entfernung räumlich sehr enge begrenzt sein wird.

Nach den beiden Methoden von Edison und Kitsee ist bereits die Möglichkeit einer gegenseitigen Verständigung gegeben.

Fig. 17.



Die Wellentelegraphie. Wiewohl bereits Hughes in seinen leider allzulange verschwiegen gebliebenen Untersuchungen alle Grundlagen für die Wellentelegraphie geschaffen hatte, so kann doch, weil Hughes selbst über die Grundursachen der von ihm wahrgenommenen Erscheinungen im unklaren blieb, von einer Entwickelung dieser Art von Telegraphie durch elektrische Wellen erst nach Bekanntwerden der epochalen Untersuchungsergebnisse von Hertz gesprochen werden. Hertz hat hierdurch in unzweifelhafter Weise nachgewiesen, dass sich unter ganz bestimmten speziellen Versuchsbedingungen elektrische Wirkungen, deren Wesen an und für sich unerklärbar bleibt, wellenförmig hin und her bewegend durch den Aether fortpflanzen, während unter anderen Umständen und unter anderen Versuchsbedingnissen von einer solchen Ausbreitung in Wellenform, wie beispielsweise bei der elektromagnetischen oder elektrostatischen Induktion, keine Rede sein kann,

Digitized by Google

und die Fortpflanzung daher entweder geradlinig erfolgt oder von einer solchen überhaupt nichts wahrgenommen wird.

Wenn nun trotzdem, dass die Versuchsergebnisse und deren theoretische Begründung von Hertz bereits in den Jahren 1888 und 1889 zur allgemeinen Kenntnis gelangten, über dieselben achtlos hinweggegangen wurde, und wie aus den eingangs vorgeführten Daten hervorgeht, die Versuche auf dem Wege der drahtlosen Telegraphie sich noch immer in den alten Bahnen bewegten, so findet dies, wiewohl Hertz in einem Briefe an den Civilingenieur Huber in München vom 3. Dezember 1889 über dessen Anfrage, ob sich mittels elektrischer Wellen telegraphieren lasse, diese Möglichkeit bezweifelt, hauptsächlich seinen Grund darin, dass ein entsprechend empfindlicher Empfänger noch nicht gekannt war. Es ist demnach Marconis ureigenstes Verdienst, die Idee, elektrische Wellen zur Telegraphie durch den Raum auszunützen, wieder aufgegriffen und unter Anwendung des durch Branly entdeckten, von Lodge verbesserten Empfangsapparates, des sogenannten Kohärers, eine Einrichtung geschaffen zu haben, welche den praktischen Anforderungen Rechnung trägt und die Möglichkeit der Nachrichtenvermittelung auf diesem Wege nachweist.

Bevor jedoch auf die Beschreibung der einzelnen Einrichtungen, durch welche es gelungen ist, Nachrichten mittels Hilfe elektrischer Wellen, ohne Benützung eines Drahtes als Verbindungsglied, durch den Raum zu befördern, näher eingegangen werden kann, ist es notwendig, das Entstehen solcher Wellen einigermassen zu beleuchten.

Als einfachstes Beispiel für die Entstehung von Wellen sind tönende Körper zu betrachten, die durch einen raschen Impuls angeregt, in elastische Schwingungen versetzt werden und diese Schwingungen auf die umgebende Luft übertragen, in welcher sich selbe ausbreiten und als Schallwellen fortpflanzen. Es bedarf jedoch, um diese elastischen Schwingungen eines tönenden Körpers hervorzurufen, eines plötzlichen oder mehrerer plötzlicher Impulse, während, wenn die Anregung langsam vor sich geht, derartige Schwingungen nicht entstehen. Dies lässt sich am besten an einem gespannten Seile demonstrieren, auf welchem, wenn man es langsam hin und her führt, keine Wellen entstehen, welches sonach, wenn es losgelassen wird, keinen Ton gibt. Schnellt man aber dieses Seil mit einem raschen Ruck aus seiner Ruhelage, so wird es in rasche Schwingungen versetzt, welche sich der umgebenden Luft mitteilen und als Schallwellen unserem Gehöre vernehmlich werden. Für die Schallwellen kommt als erschüttertes Medium die den schwingenden Körper umgebende, atmosphärische Luft

Digitized by Google

in Betracht, in welcher sich die Schwingungen nur relativ langsam fortbewegen können, weshalb auch die Länge der Wellen, d. h. der Abstand eines Wellenberges über das Wellenthal bis zum nächsten Wellenberg eine sehr grosse ist. Licht und Wärme pflanzen sich, wie schon lange nachgewiesen ist, ebenfalls durch Wellenbewegung fort, hier ist es aber nicht die schwerfällige Luft, sondern der als unendlich fein und leicht beweglich anzusehende Aether, welcher als Uebertragungsmedium dient. Der zeitliche Verlauf der im Aether entstehenden Licht- und Wärmewellen ist ein unendlich kurzer und die Uebertragungsgeschwindigkeit eine dementsprechend ausserordentlich grosse. Um nun diese so äusserst leicht bewegliche Materie in die entsprechende Schwingung versetzen zu können, müssen die einzelnen Impulse nicht nur sehr plötzlich erfolgen, sondern sich auch in rascher Reihenfolge wiederholen, um zu einem dauernden Effekte zu führen. Fasst man hierbei ins Auge, dass die Lichtwellen eine Wellenlänge von weniger als 0,001 mm haben, das Licht sich hierbei mit einer Geschwindigkeit von 300 000 km pro Sekunde fortpflanzt, so ergibt sich, da ein Lichtimpuls, um auf unser Auge wirken zu können, ca. $^1/_{20}$ Sekunde andauern muss und das Bestehen eines derartigen Eindruckes auf der Netzhaut ungefähr $^1/_3$ Sekunde währt, dass ungefähr 250 000 000 000 000 Lichtwellen auf dieselbe wirken, ehe der Eindruck der ersten Lichtwelle verschwunden ist, daher ebenso viele Bewegungsimpulse von der Erregungsquelle ausgehen müssen. Dass das Licht wirklich nur auf einer Wellenbewegung beruht, geht schon aus der beim Lichte nachgewiesenen Erscheinung der Interferenz hervor. Man beobachtet nämlich, dass unter Umständen Licht zu Licht addiert, nicht verstärktes Licht, sondern Dunkelheit ergibt. Diese Thatsache lässt sich nur durch die Annahme erklären, dass in einem solchen Falle zwei Wellenbewegungen so zusammentreffen, dass ein Wellenberg der einen Wellenbewegung einem Wellenthal der anderen Wellenbewegung begegnet und sich diese beiden entgegengesetzten Bewegungsrichtungen in ihren Wirkungen wie plus und minus aufheben.

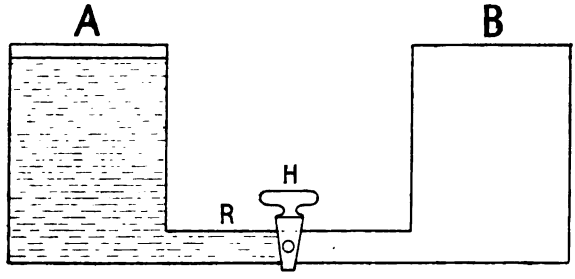
In ganz analoger Weise erklärt man sich die Fernwirkung der durch äusserst rasch folgende oder oscillierende Stromimpulse in Erregung gelangten elektrischen Kräfte. Man schreibt diese Fernwirkung gleichfalls einer Wellenbewegung des Aethers zu, welche sich, wie experimentell nachgewiesen wurde, gleichfalls mit einer Geschwindigkeit von 300 000 km in der Sekunde fortpflanzt. Die verschiedene Wirkung gegenüber der Wellenbewegung des Aethers bei Licht- und Wärmeerscheinungen lassen sich durch die Länge der hierbei entstehen-

Digitized by Google

den Wellen, welche je nach der Anzahl der Impulse zwischen 10 m bis 1 cm schwanken, erklären. Die Entstehung solcher Wellen bedingt daher das Vorhandensein einer Anzahl von Erregungsimpulsen, die auf mehrere Millionen in der Sekunde geschätzt wird. Der Unterschied zwischen der Wellenbewegung und der statischen und elektromagnetischen Induktion tritt hierdurch klar zu Tage, indem selbst bei raschester Unterbrechung des Primärstromes eines Induktoriums, welche ja oft mehrere Tausende in der Sekunde beträgt, nicht jene ungeheure Anzahl von Erregungsimpulsen erzeugt werden kann, wie solche zur Entstehung von elektrischen Wellen erforderlich sind.

Es müssen daher, ähnlich wie beim Schalle die Tonwellen, auch die elektrischen Wellen durch elektrische Schwingungen in gewissen Körpern den elektrischen Oscillatoren hervorgerufen werden. Genauere Beobachtungen haben nun schon lange ergeben, dass die Entladung

Fig. 18.



von Leydener Flaschen nicht immer ein einfacher Ausgleich der positiven und negativen Elektrizität ist, sondern sich hier oft jene Vorgänge abspielen, welche man als elektrische Oscillationen bezeichnet. Es findet hier ein rasches Hin- und Herschwingen der Elektrizität zwischen dem Entladungsknopfe der Leydener Flasche und dem Knopfe des Entladers statt, wobei allerdings Bedingung ist, dass die beiden Knöpfe sich nicht direkt berühren. Eine Analogie dieses Vorganges findet sich beispielsweise in folgendem hydraulischen Exempel. Es seien A und B (Fig. 18) zwei durch das weite Rohr R verbundene Gefässe. In der Mitte des Rohres befinde sich der Hahn H, welcher den Wasserzufluss vom Gefäss A in das Gefäss B absperrt. Wird nun der Hahn H geöffnet, so fliesst das Wasser in das Gefäss B über, wobei jedoch infolge der lebendigen Kraft mehr Wasser nach B überströmt, als für den hydraulischen Ausgleich erforderlich ist. Das überschüssige Wasser wird nun nebst einem kleineren Ueberschusse wie früher nach A zurück-

Digitized by Google

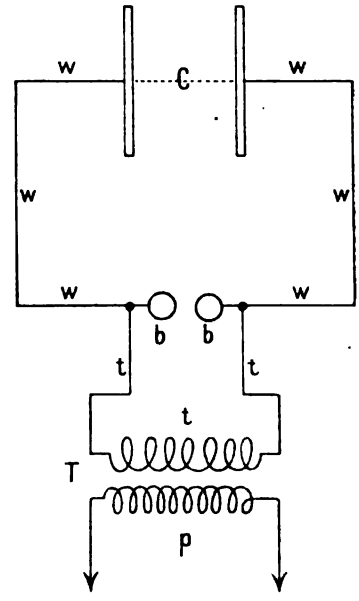
strömen und es entsteht eine allmählich sich abschwächende hin und her gehende Bewegung des Wassers, bis es endlich den vollen Gleichgewichtszustand erreicht. Sollen die Oscillationen fortdauern, so muss der stets wieder auftretende Gleichgewichtszustand auf künstlichem Wege von neuem aufgehoben werden, was in dem vorliegenden Falle etwa durch einen auf B stossweise wirkenden Druck verursacht werden kann. In ähnlicher Weise können die Oscillationen, welche bei Entladung einer Leydener Flasche hervorgerufen werden, durch konstantes Nachladen der Flasche aufrecht erhalten bleiben. Zwischen jeder Entladung wird dann eine Pause entstehen, bis die gegenseitige Spannung zwischen Flasche und Entlader wieder so gross geworden ist, dass selbe den gegebenen Luftwiderstand zu überwinden vermag. Je geringer dieser Widerstand ist, in desto geringeren Abständen werden sich die einzelnen Entladungen folgen, so dass die Oscillationen beinahe kontinuierlich aufrecht erhalten bleiben. Dass nun zwischen den beiden Kugeln der Funkenstrecke wirklich oscillatorische Entladungen entstehen, hat Feddersen bereits im Jahre 1858 dadurch nachgewiesen, dass er das Bild der entstehenden Funken in einem rasch rotierenden Spiegel beobachtete, wobei es sich zeigte, dass der gesamte Entladungsfunke aus einer Reihe von einzelnen Funken bestand, welche an den Endladestellen oder Polen das Aussehen einer abwechselnd entgegengesetzt gerichteten Entladung boten. Diese oscillatorische Entladung tritt jedoch nach Feddersen nur dann immer ein, wenn der Widerstand der Entladungsleitung nicht zu gross ist. Es lässt sich dies durch einen Vergleich mit den beiden kommunizierenden Gefässen versinnbildlichen. Ist die Verbindungsröhre R sehr eng, setzt sie sonach dem Durchgange der Wassermassen einen bedeutenderen Widerstand entgegen, so wird die lebendige Kraft der Flüssigkeit aufgezehrt und der Ausgleich erfolgt nur langsam und ohne Schwankungen, weil ja ein Ueberstürzen nicht mehr stattfinden kann.

Praktisch können solche Oscillationen zwischen zwei Punkten einer Funkenstrecke mittels Leydener Flasche nur sehr schwer aufrecht erhalten werden, weshalb man sich nunmehr für derartige Versuche eines kräftigen Induktoriums bedient, dessen sekundäre Wickelungen in eine Funkenstrecke endigen. Die allgemeine Anordnung einer solchen Einrichtung ist in Fig. 19 dargestellt. In derselben bezeichnet T das Induktorium, dessen Primärspule p mit der hier nicht gezeichneten Batterie und dem gleichfalls nicht dargestellten Unterbrecher in Verbindung steht. t ist die Sekundärspule, welche in die zwei Entladungskugeln b b endigt. Von diesen beiden Entladungskugeln

Digitized by Google

führen in Abzweigung die Drähte ww zu den beiden Belegen eines Kondensators C. Hertz hat nun nachgewiesen, dass bei Bethätigung dieser Einrichtung, die zwischen den beiden Kugeln bb auftretenden Entladungen nicht nur elektrische Wellen in den Raum entsenden, sondern auch in den Drähten ww elektrische Wellen von grosser Geschwindigkeit erzeugen. Diese Wellen in den Drähten sind oscillatorische, d. h. hin und her gehende, welche sich jedoch nicht in die Sekundärspule fortpflanzen können, weil selbe grosse Selbstinduktion besitzt, daher dem Entstehen solcher Wellen einen nicht überwindbaren Widerstand entgegensetzt. Da auch die stehenden Wellen in diesen Drähten für die Telegraphie durch den Raum mit in Betracht kommen, ist es von Interesse, zu ersehen, wie solche Wellen zur Entstehung gelangen, wofür wir uns wieder hydraulischer Analogieen bedienen wollen. Es sei jedoch hier noch vorausgesendet, dass in dieser Einrichtung, welche im Prinzipe mit der von Hertz angegebenen Anordnung übereinstimmt, bei Entsendung von intermittierenden oder Wechselströmen von ca. 200 Volt Spannung in die Primärspule, in der Sekundärspule eine Spannung von ca. 20000 Volt auftritt und dass die Entfernung der beiden Entladungskugeln ca. 6 mm beträgt. Um nun zu dem Vergleiche mit der hydraulischen Analogie zu gelangen, denken wir uns in Fig. 20 ein System eiserner Röhren $w^1 w^1$ etc., in welches ein grösseres und ein kleineres Reservoir W und S zwischengeschaltet ist. Jedes dieser Reservoire sei durch eine elastische Wand p bezw. l getrennt. Die Wand p besitze eine Widerstandsfähigkeit, dass sie bei dem grössten auf selbe ausgeübten Drucke zwar ausweicht, aber trotzdem ihre Kontinuität behält. Dem entgegen wird von der elastischen Wand l angenommen, dass sie unter geringerem Drucke nachgibt, bei grösserem Drucke aber plötzlich zerreisst. Würde nun der Piston t^1 unter der Voraussetzung, dass das ganze System mit Wasser gefüllt ist, von der normalen oder Ruhelage a^1 mittels des Handgriffs h innerhalb der Grenzen $a^1 a^1$ hin und her bewegt werden,

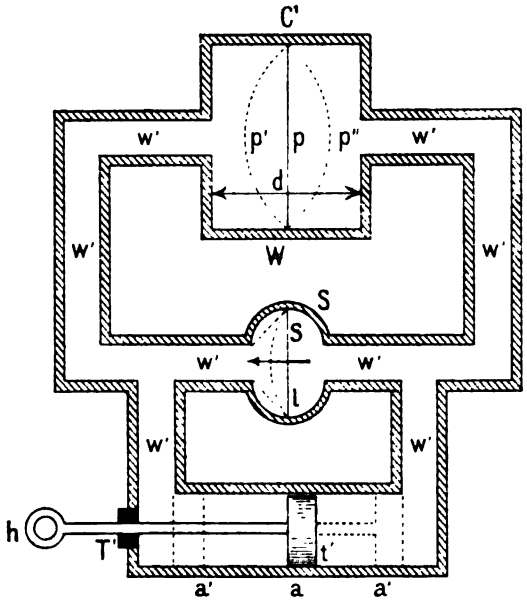
Fig. 19.



Digitized by Google

wie solches durch die punktierten Linien angedeutet ist, so würde sich bei Verfolg dieser Bewegung folgendes abspielen: In der Ruhelage befindet sich der Piston in der Lage a, im ganzen Systeme herrscht Gleichgewicht und befinden sich dementsprechend die beiden Membranen in der Ruhe- oder Mittellage. Wird nun der Kolben von der Lage a nach rechts in die Lage a^1 verschoben, so wird der Wasserdruck auf der rechten Seite des Röhrennetzes vergrössert, auf der linken Seite desselben hingegen verringert. Hierdurch werden, da der Druck von rechts stets steigt, der Druck links aber abnimmt, die beiden elasti-

Fig. 20.



schen Wände nach links ausgebogen. Je mehr sich a dem Ende seiner Bewegung a^1 nähert, desto grösser wird die Ausbauchung dieser Membranen sein. Es sei nun vorausgesetzt, dass wenn der Kolben von a bei a^1 anlangt, die Scheidewand p die Lage p^1 einnimmt, die Scheidewand l hingegen unter dem auf selbe ausgeübten Drucke plötzlich reisst oder platzt. Durch dieses Reissen von l wird dem Wasser in der mittleren Röhre, der Durchgang von rechts nach links geöffnet und es wird sohin in demselben Momente von der rechten Seite des Röhrennetzes in die linke Seite desselben einströmen. Die Geschwindigkeit, mit welcher das Wasser hierbei einströmt, wird infolge der

Digitized by Google

Elastizität der Membrane p so lange ansteigen, als die Bewegung des Kolbens t^1 in der gleichen Richtung andauert. Kommt jedoch der Kolben zur Ruhe, so hört trotzdem die Wasserbewegung nicht auf, weil die Wand p infolge ihrer Elastizität nunmehr bis p^2 gelangt ist. Hat sich daher auch der Wasserdruck beiderseitig ausgeglichen, so sucht die bei p^2 in Spannung befindliche Membrane in die Ruhelage zurückzukehren, wobei sie aber infolge ihrer Elastizität gleich einem Pendel hin und her schwingen und dementsprechend auch die Wassermassen einmal von links nach rechts und dann von rechts nach links treiben wird. Die so entstehenden Oscillationen der Wassermasse verringern sich jedoch, infolge der Reibung in den Röhren, allmählich und das Wasser gelangt nach längerer oder kürzerer Zeit wieder zur Ruhe. Denkt man sich nun, was in diesem Falle praktisch unmöglich ist, die elastische Zwischenwand l, jedesmal, wenn der Kolben bei a anlangt, plötzlich wiederhergestellt und den Kolben von a^1 nach a^1 (links) gezogen, so wird unter sonst ganz gleichen Voraussetzungen der ganz gleiche Vorgang jedoch in der entgegengesetzten Richtung zu beobachten sein. Würde nun der Kolben fortwährend zwischsn a^1 und a^1 hin und her geschoben, so lässt sich leicht die Vorstellung gewinnen, dass sich die Wassermasse unter diesen Umständen in fortwährender oscillatorischer Bewegung befinden muss.

Die Nutzanwendung dieses von Prof. E. F. Northrup gegebenen interessanten Vergleiches auf das Entstehen oscillierender elektrischer Ströme findet sich sofort, wenn man die Fig. 19 mit der Fig. 20 vergleicht. Als Pumpencylinder T ist in Fig. 19 die primäre Spule p, als Pumpenkolben die Sekundärspule t zu betrachten. Das Röhrennetz w^1 wird durch die Leitungen w, die sich nach Zerreissen stets wieder regenerierende elastische Scheidewand l durch die Funkenstrecke zwischen b b und die nicht zerreissbare elastische Scheidewand p durch das Dielektrikum des Kondensators C dargestellt. Die Hauptähnlichkeiten zwischen den elektrischen Strömen und den Wasserströmen lassen sich wie folgt hervorheben und zwar: Je rauher die Oberflächen der Wasserröhren sind, desto grösser wird die Reibung zwischen denselben und dem Wasser sein und desto rascher werden die Oscillationen verschwinden. Die Rauheit der Oberflächen lässt sich mit dem Ohmschen Widerstande des angewendeten Leitungsmaterials vergleichen. Je geringer dieser Widerstand ist, desto länger werden die Oscillationen dauern.

Die Zeit, welche das Wasser benötigt, um eine vollständige Oscillation durchzuführen, also die Zeit, welche die Zwischenwand so

Digitized by Google

benötigt, um sich von p^1 nach p^2 und von p^2 wieder zurück nach p^1 zu bewegen, hängt von der zu bewegenden Wassermasse, von der Elastizität der Zwischenwand p, von der Grösse der möglichen Ausbauchung derselben und von der Länge des Röhrennetzes ab. Je geringer die Wassermasse, je kürzer die Röhren und je weniger ausbauchungsfähig die elastische Zwischenwand ist, desto kürzer werden die Oscillationen ausfallen. In dem elektrischen Stromkreise ist es nicht die Quantität des Stromes, sondern das den Leiter umgebende Medium, welches der Wassermasse bezüglich des Einflusses auf die Oscillationsdauer entspricht. Selbes ist nur insoferne der Wassermasse vergleichbar, als es gleichfalls Trägheit besitzt. Zirkuliert ein elektrischer Strom in der Leitung, so wird sich auch dieses Medium mehr oder minder in Bewegung befinden. Die Menge dieses in Bewegung befindlichen Mediums hängt von der Länge des Drahtes und der Art, wie derselbe aufgewickelt ist, ab, geradeso wie die Wassermenge von der Länge und dem Querschnitte der Röhren abhängig ist. Die Geschwindigkeit des Mediums ist der Stärke des in dem Drahte zirkulierenden Stromes proportional. Diese Bewegung des den Stromkreis umgebenden Mediums offenbart sich in den magnetischen Kraftlinien. Setzt eine einheitliche Strommenge eine gewisse Menge des den Stromkreis umgebenden Mediums in Bewegung, so sagt man, der Stromkreis habe eine bestimmte Induktanz oder einen bestimmten Selbstinduktionskoëffizienten. Dieser Selbstinduktionskoëffizient ist in der Wasseranalogie durch die Wassermasse dargestellt und ist, da die Periode der Oscillationen proportional der Wassermasse ist, in konformer Weise die Oscillationsperiode der Elektrizität proportional dem Selbstinduktionskoëffizienten. Je länger der Draht und je mehr derselbe aufgewunden ist, desto grösser wird dieser Koëffizient sein.

Unmittelbar bevor die elektromotorische Kraft, welche die Elektrizität in Bewegung setzt, gross genug ist, um die kleine Funkenstrecke zwischen b b zu durchbrechen, wird in dem Medium zwischen den beiden Kondensatorplatten eine gewisse Spannung auftreten, welche der Ausbauchung der oberen Zwischenwand, bei dem Beispiele über die Entstehung der Wasseroscillationen entspricht. Es wird daher das Dielektrikum des Kondensators durch die elektromotorische Kraft in eine ausser der normalen Beschaffenheit gelegene Spannung gebracht, deren Grösse von der Natur des Dielektrikums ebenso abhängt, wie die Spannung der Zwischenwand von der Dicke derselben bei einem gegebenen Wasserdrucke. Die in beiden Fällen hervorgerufene Spannung wird um so geringer sein, je dicker die gespannte

Digitized by Google

Substanz ist. Je näher die beiden Kondensatorplatten aneinander gerückt werden, desto dünner ist das Dielektrikum, desto grösser daher die Spannung oder Verschiebung in demselben und desto grösser wird die Elektrizitätsmenge sein, die durch einen imaginären Querschnitt unter einem bestimmten Drucke nachfliessen wird. Die gleiche Erscheinung lässt sich im Wasserbeispiel konstatieren, wenn die Dicke der elastischen Zwischenwand verringert wird.

Stellt man die Bedingungen, welche die Oscillationen im Wasserstromkreis und elektrischen Stromkreise hervorrufen, nebeneinander, so entspricht die Rauheit der inneren Oberfläche der Röhren dem Ohmschen Widerstande des Leiters, in Bezug auf dessen Qualität, die Masse des zirkulierenden Wassers, der Selbstinduktion des Stromkreises, die Elastizität der Zwischenwand p, der Kapazität des Kondensators und die Stärke der Zwischenwand l der Länge der Funkenstrecke zwischen bb.

Aus dieser Vergleichung geht auch hervor, dass die Grösse der Kondensatorplatten und die Distanz, auf welcher sie auseinander gerückt sind, also die Kapazität des Kondensators, der Grösse der Elastizität und der Oberfläche der elastischen Zwischenwand gleichzuachten ist und dass daher die Oscillationen des elektrischen Stromkreises um so langsamer vor sich gehen werden, je grösser die Kapazität des Kondensators ist. Die supponierte plötzliche Wiederherstellung der Zwischenwand l lässt sich im elektrischen Stromkreise durch das Einströmen kalter Luft in die Funkenstrecke bb, sobald die Oscillationen im Stromkreise verschwunden sind, thatsächlich erklären.

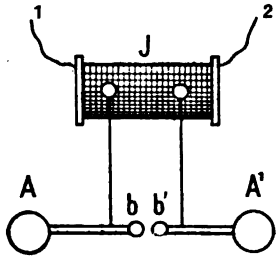
Dass man es bei den durch solche Entladungen sowohl in dem Aether als auch in dem Drahte mit elektrischen Wellen thatsächlich zu thun hat, wurde von Hertz in seinen Untersuchungen in überzeugender Weise nachgewiesen, indem die charakteristischen Eigenschaften solcher Wellenbewegungen auch denen durch Elektrizität erzeugten zu eigen sind. So zeigen diese Wellen Resonanz und können durch Interferenzwirkungen in stehende Wellen umgewandelt werden. Die im freien Raume sich fortpflanzenden Wellen können gebrochen, reflektiert werden, sie werfen Schatten der elektrischen Kraft und verhalten sich in jeder Beziehung analog den Licht- und Wärmewellen, wobei allerdings die Mittel, durch welche diese Erscheinungen nachgewiesen werden können, sich von denen zur Untersuchung der Eigenschaften der Licht- und Wärmewellen wesentlich unterscheiden.

Indem hier einige der Versuche von Hertz, welche den Nachweis liefern, dass man es bei den oscillatorischen Entladungen thatsächlich mit

Digitized by Google

elektrischen Schwingungen zu thun hat, vorgeführt werden sollen, sei auch der Anordnung des Apparates gedacht, den Hertz zur Erzeugung oscillatorischer Schwingungen verwendete. Derselbe ist in seiner Anordnung in Fig. 21 dargestellt. J ist das Induktorium, dessen beide Enden der Sekundärwickelung mit den Entladungskugeln $b\,b^1$ in Verbindung stehen. Diese Entladungskugeln sind mit den beiden Kapazitätsflächen $A\,A^1$, die eigentlich nichts anderes als die Belege eines Kondensators darstellen, verbunden. Die Entfernung zwischen $b\,b^1$ beträgt 10,6 mm und die in der Sekundärspule erreichbare Spannung beträgt 20000 Volt. Diese Anordnung ist mit der in Fig. 18 dargestellten Anordnung nahezu identisch, nur erscheinen hier die beiden Kapazitätsflächen in einer Ebene angeordnet, während selbe in Fig. 18 parallel gestellt sind. Hertz hat diese beiden Kapazitätsflächen zum ersten Male angewendet, um die bei Entladungen zwischen zwei Punkten eines Rhumkorffapparates entstehenden Oscillationen zu vergrössern. Aus diesem Grunde hat er auch diese beiden Kapazitätsflächen mit dem Namen Oscillator bezeichnet.

Fig. 21.



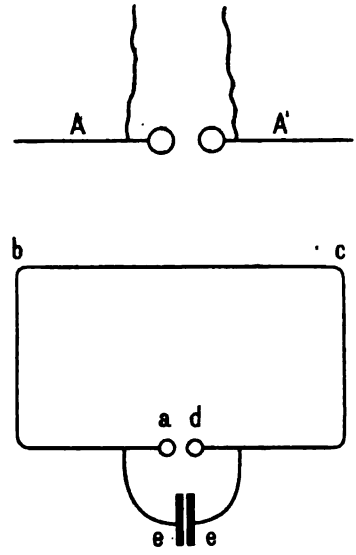
Mouton zeigte schon im Jahre 1876, dass bei derartigen Entladungen zwischen den offenen Punkten einer Sekundärspule Oscillationen oder Schwingungen von 0,0001 Sekunden ungefährer Dauer entstehen und war die Anwendung des Induktoriums, welche sich für derartige Zwecke besser eignet als die Leydener Flasche oder sonst eine statische Maschine, von selbst gegeben, nur musste darauf Bedacht genommen werden, die Schwingungsdauer noch mehr zu verkürzen, was durch die Anwendung des Oscillators auch vollkommen gelungen ist. Die Wirkung dieser Oscillatoren lässt sich dadurch erklären, dass sie sich vorerst laden und sodann die Wirkungen der Induktionsspule zur Entladung zwischen der Funkenstrecke unterstützen, sozusagen den Funken leichter auslösen, ohne hierbei jedoch, da die Induktionsspule stets das Uebergewicht behält, die Ladung zu verlieren.

Den Nachweis, dass die rapiden Aenderungen im Entlader thatsächlich Schwingungen sind, lieferte Hertz in folgender Weise. Er stellte gegenüber dem Auslader Fig. 22 eine sekundäre Leitung a b c d, welche bis auf die sehr kurze Luftstrecke a d in sich zurückkehrte. Die schnellen Stromschwankungen in $A\,A^1$ induzierten dann in der sekundären Leitung ebenfalls schnelle Stromschwankungen, welche sich durch Auftreten von Fünkchen zwischen a d kundgaben. Für diese

Digitized by Google

Induktionswirkungen konnte Hertz unter bestimmten Bedingungen Resonanz nachweisen. Die Leitung a b c d ist ein Gebilde, in welchem die Elektrizität Schwingungen ausführen kann, deren Periode durch Selbstinduktion und Kapazität gegeben ist. Sind nun die in A A′ stattfindenden rapiden Schwankungen der Elektrizität thatsächlich Oscillationen, so können ihre Induktionswirkungen nur dann in a b c d elektrische Resonanz hervorrufen, wenn die Periodenzahl der Oscillationen mit der natürlichen Periodenzahl des Sekundärkreises übereinstimmt. Die Eigenschwingungsdauer der sekundären Leitung hängt nun von deren Selbstinduktion und Kapazität ab und kann dieselbe daher durch Veränderung der Kapazität nach Belieben abgestimmt werden. Zu diesem Zwecke verband Hertz die Enden a und d mit den verstellbaren Platten eines kleinen Kondensators e e, dessen abänderbare Kapazität dann den „Eigenton" bestimmte. Hierdurch konnte er nachweisen, dass nur bei einem bestimmten Abstand der Platten voneinander, zwischen a und d starke Funken übersprangen, während bei Vergrösserung oder Verringerung dieses Abstandes die Funken bedeutend schwächer wurden. Diese Erscheinung zeigt, dass thatsächlich Resonanz entsteht, wie solche auch durch Aenderung der Drahtlängen und der Periode der Erregers, wenn nur die Perioden in Einklang gebracht wurden, auch jedesmal nachgewiesen werden konnte.

Fig. 22.



In ähnlicher Weise wurde von Hertz durch Anwendung eines metallischen Parabolspiegels die Reflektierbarkeit und mittels eines Pechprismas die Brechung der elektrischen Wellen und sohin die vollständige Uebereinstimmung in Bezug auf ihr Verhalten mit den Licht- und Wärmewellen in überzeugender Weise nachgewiesen.

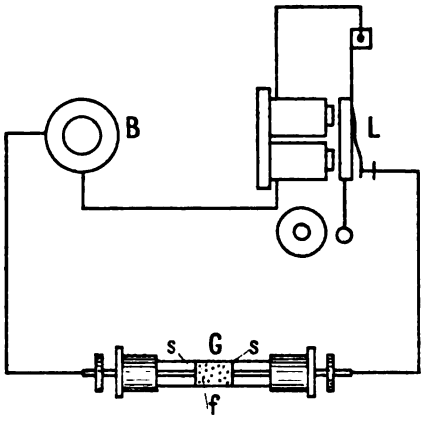
Diese Wellen der elektrischen Kraft sind einfache Transversalwellen, weil die Richtung der elektrischen Kraft an allen Stellen senkrecht auf die Richtung steht, in welcher die Welle fortschreitet. Bezüglich dieser Wellen ergibt sich die Thatsache, dass fast alle Körper für dieselbe durchlässig sind, und nur die Metalle hiervon eine

Digitized by Google

Ausnahme machen, welche sich als absolut undurchlässig für die Wellen elektrischer Kraft erweisen.

In experimenteller Weise lassen sich diese Erscheinungen bei Anwendung eines entsprechenden Empfangsapparates, welcher auf elektrische Wellen anspricht, äusserst anschaulich vorführen. Dieser Empfangsapparat ist der sogenannte Kohärer oder Fritter auch Frittröhre genannt und besteht Fig. 23 aus einem Glasröhrchen G, in welche eine geringe Menge äusserst feiner Feilspäne f irgend eines Metalles eingefüllt werden. An diese Feilspäne schliessen rechts und links zwei Metallscheibchen s s an, die mit den von einer galvanischen Batterie B abgehenden Drähten verbunden sind. Die Glasröhre wird durch zwei Hülsen abgeschlossen, durch deren mit Muttergewinden

Fig. 23.



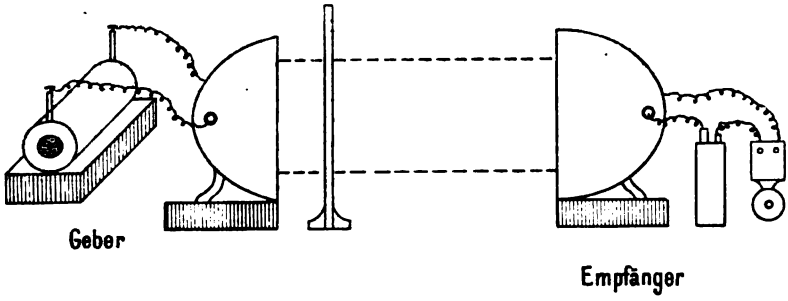
versehene Oeffnungen die Drähte hindurchgehen, so dass der Abstand der beiden Metallscheibchen nach Bedarf reguliert werden kann. Die so in die Glasröhre eingeschlossenen Metallfeilspäne setzen dem Durchgange eines elektrischen Stromes unter normalen Verhältnissen einen nahezu unüberwindlichen Widerstand entgegen, so dass ein in diesen Stromkreis eingeschaltetes Zimmerläutewerk L nicht zum Ansprechen gelangt. Werden diese Feilspäne jedoch von Wellen elektrischer Kraft getroffen, so vermindern sie ihren Widerstand so bedeutend, dass nunmehr der Strom durch dieselben hindurchgehen kann und das Läutewerk zum Ertönen gebracht wird. Diese Widerstandsverminderung bleibt auch nach Aufhören der Einwirkung der elektrischen Wellen weiter bestehen, allein es genügt ein leiser Schlag auf die Glasröhre, welcher die Feilspäne durcheinander rüttelt, um

Digitized by Google

den normalen nichtleitenden Zustand dieser Feilspäne wieder herzustellen.

Wird nun eine Hertzsche Funkenstrecke und eine solche Frittröhre gesondert in die horizontal liegende Brennlinie eines gekrümmten Metallspiegels eingebaut und werden dieselben in einem gewissen Abstand so parallel einander gegenübergestellt, dass sie sich die offenen Seiten zukehren (Fig. 24), so lassen sich nach Herstellung der Verbindung mit den zugehörigen Apparaten, also in dem einen Falle mit dem Induktorium und der zugehörigen Batterie, in dem anderen Falle mit dem Läutewerke und der Lokalbatterie des Empfängers, alle diese Erscheinungen in anschaulicher Weise hervorrufen. Die Paraboloide wirken in diesem Falle, wenn die Funkenstrecke bezw. die Frittröhre genau im Brennpunkte desselben aufgestellt ist, ähnlich wie ein Parabolspiegel für das Licht, indem selbe die nach allen Richtungen sich

Fig. 24.

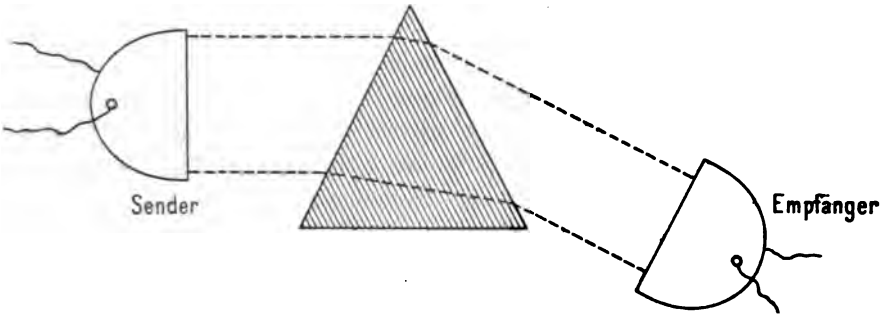


verbreitenden elektrischen Wellen in horizontaler Richtung reflektieren und im Empfänger die aufgenommenen Strahlen wieder im Brennpunkte auf den Fritter konzentrieren. Werden nun im Geber durch Schliessen des Stromkreises der Primärspule elektrische Wellen erzeugt, so werden selbe parallel auf den Empfänger geworfen, dort im Brennpunkte bezw. der Brennlinie konzentriert und gelangen so zum Fritter, welchen sie in der angegebenen Weise zur Wirksamkeit bringen. Stellt man nun, wie dies in Fig. 24 angedeutet ist, einen Metallschirm zwischen die beiden Paraboloide, so wird, da Metalle für elektrische Wellen undurchlässig sind, der Fritter bei Betriebsetzung des Empfängers nicht mehr ansprechen. Ersetzt man diesen Metallschirm durch einen Holzschirm, welcher die elektrischen Wellen hindurchlässt, so spricht der Fritter und mit ihm das Klingelwerk an. Wird nun ein Pechprisma P zwischen Geber und Empfänger gestellt, so werden die elektrischen Wellen oder Strahlen gebrochen

Digitized by Google

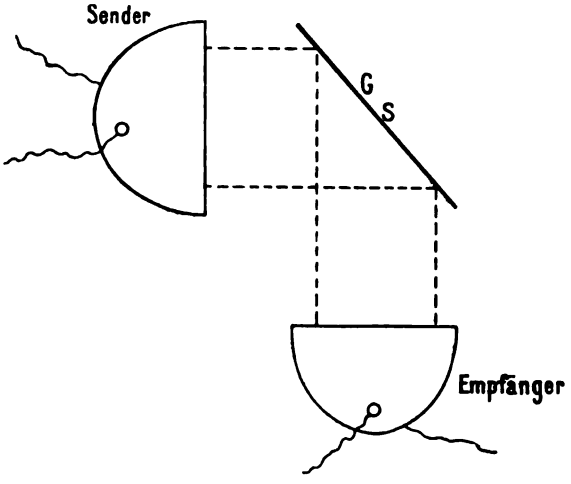
und können bei paralleler Aufstellung der Apparate nicht mehr zum Empfänger gelangen. Neigt man jedoch den Empfänger (Fig. 25) so, dass die gebrochenen Strahlen von demselben aufgefangen werden können, so wird derselbe neuerdings zur Wirksamkeit gelangen.

Fig. 25.



Stellt man in die Mitte des Weges zwischen Geber und Empfänger einen 45° geneigten Metallspiegel GS, so werden die Wellen in der in Fig. 26 angedeuteten Weise reflektiert und der Empfänger muss, um

Fig. 26.



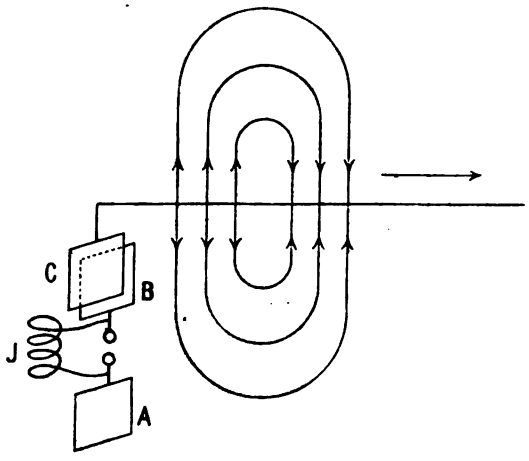
ansprechen zu können, in die daselbst dargestellte Lage gebracht werden.

In ähnlicher Weise lässt sich auch die Polarisation und Interferenz der elektrischen Wellen nachweisen, doch kann hier des näheren nicht weiter eingegangen werden.

Digitized by Google

Stehende elektrische Wellen auf Drähten. Wie schon durch den Vergleich einer hypothetischen Wassersäulenmaschine mit dem Oscillator (Fig. 19 und 20) nachgewiesen wurde, müssen auch in den Verbindungsdrähten zu dem Kondensator elektrische Schwingungen entstehen. Wird nach einem Versuche von Hertz (Fig. 27) gegenüber der Platte B des Oscillators in geringem Abstande von derselben die in einen langen Draht endigende Platte C gestellt und der Oscillator erregt, so werden die in B entstehenden Oscillationen auf C infolge der Influenz gleichfalls Oscillationen oder Schwingungen hervorrufen, und diese Schwingungen sich längs des langen Drahtes fortpflanzen. Es müssen demnach, wenn die Oscillationen sehr rasch

Fig. 27.



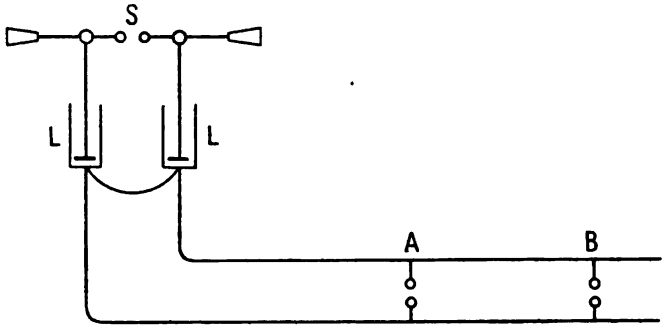
und regelmässig vor sich gehen, in dem Drahte elektrische Wellen entstehen, die sich längs desselben und zwar mit der Geschwindigkeit des Lichtes fortpflanzen, bis sie an dessen Ende gelangen. Hier werden sie zurückgeworfen und es entstehen, wenn die Länge des Drahtes einer Mehrzahl der Wellen entspricht, Interferenzerscheinungen. Bestimmte Knotenpunkte werden an zahlreichen Punkten der Leitung gebildet, innerhalb welcher sich die stehenden Wellen entwickeln. Diese stehenden elektrischen Wellen haben ebenso, wie überhaupt jede pulsierende elektromotorische Kraft, ein magnetisches Feld und pflanzen sich nur längs einer gewissen Länge der Linie, welche der halben Wellenlänge entspricht, fort. Diese Ströme werden so lange andauern, als nicht die ganze Energie in Wärme umgesetzt ist.

Ein ähnliches, sehr hübsches Experiment von Lodge zeigt die

Digitized by Google

Richtigkeit dieser Anschauung. Werden zwei durch eine Influenzmaschine in Serie geladene Leydener Flaschen LL (Fig. 28), deren äussere Belege durch einen kurzen Draht verbunden sind, und von dessen beiden Enden je eine lange Leitung abzweigt, wobei diese Leitungen miteinander parallel verlaufen, entladen, so werden, wenn die beiden Leitungen ein genaues Vielfaches von der Wellenlänge des Leydener Flaschenstromkreises haben, in beiden Drähten bei jeder Entladung der Flaschen elektrische Wellen entstehen. Diese Wellen sind voneinander entgegengesetzter Phase. Bringt man nun eine Funkenstrecke A an einem Knotenpunkte der Wellen und hinter derselben eine zweite Funkenstrecke B an, so finden beispielsweise bei A gar keine, bei B hingegen starke Entladungen statt. Diese Erscheinung lässt sich nur durch Entstehung stehender elektrischer Wellen

Fig. 28.



erklären, die eben an ihren Knotenpunkten gar keine elektrischen Spannungen aufweisen.

Die Erscheinung elektrischer Wellen an zwei so verlaufenden Drähten lässt sich mit der Röhre von Arons sichtbar darstellen. Hier werden die beiden Drähte in eine Röhre von etwa 2 m Länge eingeschmolzen und sodann die Röhre evakuiert, wobei man am besten thut, um etwa nachdrängende Luft wegzuschaffen, selbe kontinuierlich mit einer automatischen Quecksilberluftpumpe in Verbindung zu bringen. Entstehen nun auf diesen Drähten elektrische Wellen wie beispielsweise in der vorangegebenen Weise, so beginnt die Röhre zu leuchten und zwar so, dass sie, wie in Fig. 29 annähernd angedeutet ist, dort wo Wellenberge entstehen, am hellsten leuchtet, und in dieser Leuchtkraft bis zu den Knotenpunkten stetig abnimmt, welche daher dunkel erscheinen. Dieses Experiment wird am besten in einem verdunkelten Zimmer durchgeführt.

Digitized by Google

Schwingungen der magnetischen Kraft. Jede in Strömung befindliche elektrische Kraft ruft elektrodynamische oder magnetische Kräfte hervor und es müssen diese Kräfte daher, der Bewegung der Elektrizität folgend, gleichfalls hin und her oscillieren und dort am stärksten auftreten, wo die Strömung am stärksten ist. Diese magnetischen Kräfte bedingen wieder eine oscillierende Magnetisierung des umgebenden Aethers. Dass derartige magnetische Oscillationen in dem den Leitungsdraht umgebenden Raume thatsächlich dann entstehen, wenn sich in dem Leitungsdrahte stehende elektrische Wellen bilden, hat Hertz gleichfalls in sehr sinnreicher Weise experimentell nachgewiesen.

Fig. 29.

In gleicher Weise müssen die fortschreitenden elektrischen Wellen im freien Raume stets von Wellen magnetischer Kraft begleitet sein, weil ja jede in Bewegung befindliche Elektrizität ein magnetisches Kraftfeld senkrecht zu deren Fortpflanzungsrichtung erzeugt. Demgemäss stehen die Richtungen der beiden hierbei in Betracht kommenden Kräfte senkrecht aufeinander. Die Wirkungen dieser beiden Kräfte, nämlich der elektrischen und magnetischen Kraft, ergänzen sich gegenseitig und ist die Annahme daher nicht ausgeschlossen, dass die Beeinflussung der Metallspäne in der Frittröhre, nicht bloss von den elektrischen, sondern vielmehr von den sie begleitenden magnetischen Wellen herrührt.

Die verschiedenen Formen der Erreger. Zur Durchführung der Telegraphie ohne Draht sind als Grundbedingung zwei Apparate erforderlich und zwar der Erreger oder Excitator, welcher die elektrischen Wellen erzeugt und der Empfänger, welcher auf die von dem Erreger entsendeten, sich frei im Raume bewegenden, elektrischen Wellen anspricht. Die hervorragendste Rolle zur Erzeugung der elektrischen Wellen spielt der zwischen der Funkenstrecke überspringende Funke. Die durch dieses Ueberspringen entstehenden Schwingungen hängen in Bezug auf ihre Kraft und Dauer unmittelbar von der Natur dieser Funken ab. Die entstehenden Schwingungen sind um so energischer, je mehr der Funke in der Mitte ausgebaucht und je zischender das von ihm verursachte Geräusch ist.

Für die Erzeugung solcher Funken ist, abgesehen davon, dass

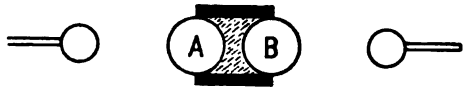
Digitized by Google

die Entfernung der beiden die Funkenstrecke bildenden Kugeln richtig eingestellt ist, die hervorragendste Bedingung, dass dieselben in sorgfältigster Weise rein erhalten werden und dass sich diese Kugeln unter der Einwirkung der Funkenentladungen nicht oxydieren, weil sonst die Funken an Wirksamkeit verlieren. Es scheint, dass in diesem Falle die Plötzlichkeit des Funkens durch Verdampfung der Oxide herabgemindert wird.

Sarasin und de La Rive haben nun gezeigt, dass durch Anwendung von Oel innerhalb der Funkenstrecke, als Medium, welches der Funke zu überspringen hat, wirksamere Funken entstehen, welche einem erhöhten Potential entsprechen, und infolgedessen die Energie der Oscillationen wesentlich erhöhen. In diesem Falle sind auch an den beiden Kugeln sich niederschlagende Unreinigkeiten, von keinem oder nur unwesentlichem Einflusse auf die Wirksamkeit der Funken.

Lodge verwendete für seine Versuche anfänglich einen Erreger mit nur zwei Kugeln und konnte hierbei gleichfalls das Entstehen elektrischer Wellen feststellen. Allein er constatierte, dass er durch

Fig. 30.



Anwendung von drei oder vier Kugeln in derselben Achse angeordnet, wobei nur die beiden äussersten Kugeln mit den Leitungen verbunden waren, viel bessere Wirkungen zu erzielen vermochte.

Righi nahm die Idee von Lodge wieder auf und änderte selbe nur insoferne ab, als er die Entladung des mittleren Funkens ähnlich wie bei Sarasin und de La Rive durch Oel erfolgen liess. Die von demselben geschaffene Anordnung ist in Fig 30 schematisch dargestellt. Die beiden mittleren Kugeln AB sind hier bedeutend grösser gehalten und werden in ihren beiden einander zugekehrten Hälften von einer Glasröhre umschlossen, welche mit feinstem säurefreiem Oele oder Vaseline angefüllt wird, so dass der Funke das Oel durchspringen muss. Die beiden äusseren Kugeln sind viel kleiner und springt der Funke von selben auf die grossen Kugeln durch die Luft über. Für die Entstehung der elektrischen Schwingungen kommt bloss der zentrale Funke in Betracht. Die von den äusseren Kugeln überspringenden Funken kaben nur den Zweck, eine elektrische Störung zwischen den beiden mittleren Kugeln hervorzurufen. Bei dieser Anordnung werden die beiden äusseren Kugeln, von den beiden inneren

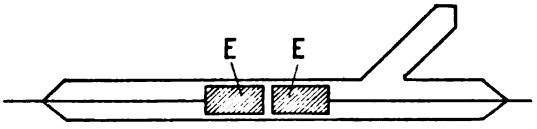
Digitized by Google

Kugeln so weit entfernt, als es die Kraft der Induktionsspule zulässt, um so das grösstmögliche Potential zu erzielen. Die Entfernung zwischen A und B wird so regulirt, dass man Funken der grössten Wirksamkeit erhält.

Der Erreger von Righi ist es, welcher seiner grossen Wirksamkeit halber für die drahtlose Telegraphie fast allgemein zur Anwendung gelangt.

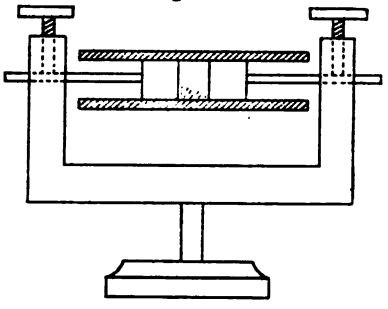
Der Kohärer. Das Prinzip, auf welchem der Kohärer oder Fritter beruht, wurde bereits festgelegt. Bezüglich der Konstruktion

Fig. 31.



desselben hat Marconi durch eingehendes Studium die Regeln, welche für selbe massgebend sind, gefunden und werden dieselben auch allgemein anerkannt. Der zwischen den beiden Elektroden E E liegende Zwischenraum muss sehr klein sein und äusserst wenig Metallfeilspäne enthalten. Die beiden Elektroden füllen eine kleine Glasröhre (Fig. 31) von 2 bis 3 mm Durchmesser vollständig aus und lassen zwischen sich nur einen kleinen Zwischenraum von 0,5 bis 1 mm bestehen. In diesen Zwischenraum wird nun eine sehr kleine Menge von Feilspänen eingefüllt, welche den Raum nicht ganz ausfüllen dürfen. Um nun die grösste Empfindlichkeit dieses Empfängers zu erhalten, ist es notwendig, die Entfernung der beiden Elektroden im Verhältnisse zu der eingefüllten Menge von Feilspänen genau zu regulieren, was eine äusserst umständliche und mühselige Arbeit erfordert. Branly führt dies in folgender Weise durch (Fig. 32): Durch zwei Oeffnungen eines Supportes werden die von den Elektroden abgehenden Drähte hindurchgesteckt und in dieser Lage mittels zweier Schrauben festgehalten, so dass die Entfernung der beiden Elektroden hierdurch bestimmt wird, wobei die Glasröhre, innerhalb welcher sich die beiden Elektroden befinden, von den Elektroden festgehalten ist. Ist nun in das Glasröhrchen zwischen den beiden Elektroden die ent-

Fig. 32.



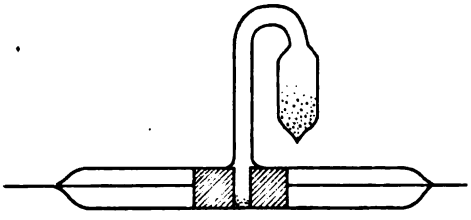
Digitized by Google

sprechende Menge von Feilspänen eingefüllt, so wird die eine der beiden Schrauben gelockert und die richtige Entfernung zwischen den beiden Elektroden durch leichte Schläge auf den ausmündenden Draht hergestellt und sodann die Schraube wieder festgezogen.

Bei der in Fig. 23 dargestellten ebenfalls von Branly angegebenen Frittröhre kann die Regulierung der Entfernung der beiden Elektroden vermittelst Schraubendrehung erfolgen.

Blondel schuf einen Kohärer, bei welchem auf die nachträgliche Regulierung des Abstandes der beiden Elektroden verzichtet wird, hingegen die Regulierung der Vergrösserung oder Verringerung der zwischen den beiden Elektroden eingefüllten Menge von Feilspänen erreicht werden kann. Zu diesem Zwecke wird an das Glasröhrchen (Fig. 33) genau über der Mitte zwischen den beiden Elektroden ein zweites, am Ende erweitertes und daselbst abgebogenes Glasröhrchen angeschmolzen. In diese Erweiterung werden die Feilspäne eingefüllt.

Fig. 33.



Die beiden Elektroden werden in die Röhre eingestellt und dieselbe sodann verschmolzen. Diese so geschaffene Frittröhre ist sohin vollkommen nach aussen abgeschlossen. Die Regulierung erfolgt durch sorgfältiges Neigen des gesamten Fritters, so dass entweder Feilspäne zwischen die beiden Elektroden eingefüllt oder aus denselben entfernt werden. Diese Art der Regulierung ist allerdings sehr schwierig, doch gewährt dieser Fritter den grossen Vorteil des Abschlusses äusserer Einflüsse. Ueber die Ursache der Wirkungsweise dieser Empfänger gehen die Anschauungen seitens derjenigen, die diese Frage eingehender studiert haben, weit auseinander.

Branly schreibt die Wirkung der Frittröhre unter Einwirkung elektrischer Schwingungen, einer Modifikation des die einzelnen Feilspäne umgebenden Aethers zu. Lodge nimmt eine allerdings sehr leichte Verschweissung der einzelnen Feilspäne unter Einwirkung dieser Wellen als Ursache dieser Wirkung an. Arons, welcher diese Wirkungen unter dem Mikroskope studierte, konnte bei seinen diesbezüglichen Beobachtungen das Ueberspringen sehr kleiner Fünkchen zwischen den einzelnen Feilspänen beobachten, und sah, dass sich zwischen den einzelnen Spänen eine Art von Brücken bildete, die dieselben verbinden. Diese unendlich feinen Brücken sollen von ver-

Digitized by Google

flüchtigtem Metalle herrühren. Als Ursache des Entstehens dieser Brücken werden von ihm die zwischen den einzelnen Teilchen unter dem Einflusse elektrischer Wellen auftretenden disruptiven Entladungen bezeichnet. Diese Ansicht wird durch die eingehenden Untersuchungen von Thomas Tommasina einigermassen bekräftigt. Nach den Untersuchungen von Blondel und Dobkéwitsch findet eine Verschmelzung bei nicht oxydierbaren Körpern nicht statt, werden jedoch oxydierbare Körper, wie Eisen, Kupfer, Nickel etc. verwendet, so lässt sich eine solche Verschmelzung oder Verschweissung konstatieren.

Ueber die Materialien, welche zur Füllung der Frittröhren benützt werden sollen, differieren die Ansichten gleichfalls. Während Marconi ein Gemenge von Silber- und Nickelspänen verwendet, ist Branly der Anschauung, dass jedes leitende Material fast gleich gute Resultate ergibt. Die Ursachen, dass in dem einen oder anderen Falle diese Frittröhren nicht genug empfindlich wirken, ist seiner Ansicht nach nur darin zu suchen, dass diese Späne nicht entsprechend hergerichtet waren. Eine der Hauptbedingungen für die Wirksamkeit eines Fritters ist, dass die Späne sehr gleichmässig sind, weshalb Branly auch nur gesiebte Späne verwendet. Bei Anwendung solcher Späne konnte er fast mit allen Metallen gleich gute Resultate erzielen.

Aber nicht bloss Metallspäne, sondern auch Metall- und Kohlenkugeln, welche lose in einer Röhre aneinander gefügt werden, zeigen unter dem Einflusse elektrischer Wellen die Eigenschaft des Frittens und können nach demselben Autor ebensogut als Empfänger wie Metallspäne verwertet werden.

Der Kohärer oder Fritter ist eines der denkbarst empfindlichen Empfangsinstrumente, die es gibt, da das empfindlichste Messinstrument kaum auf das Millionfache jener Energie ansprechen würde, bei welcher dieses Instrument sich noch als vollkommen verlässlich erweist. Um dies klarzulegen, sei darauf verwiesen, dass in der Sendestation kaum ein hundertstel Pferdekraft als Radiation zur Wirkung gelangt. Da die elektrischen Wellen sich in einer immer mehr erweiternden Sphäre ausbreiten, so wird der Flächenraum, welchen eine solche Sphäre oder Schale bei einer Entfernung von 54,4 km, welche der Weite des Kanals zwischen England und Frankreich entspricht, ca. 37 300 000 000 m^2 betragen, somit die auf einen Empfänger von 1 m^2 wirkende Kraft so unendlich klein sein, dass sie sich unserer Vorstellung nahezu entzieht.

Digitized by Google

Marconis Telegraphensystem. Marconis Telegraphensystem besteht in seiner Wesenheit für den Sender aus einem Erreger nach System Righi in Verbindung mit einem Hertzschen Oscillator abgeänderter Form und als Empfänger aus einem Kohärer, welcher im Lokalstromkreis mit zur Aufnahme der Zeichen geeigneten Apparaten verbunden ist. Für kürzere Entfernungen beschränkt sich Marconi an Stelle des Oscillators einen Reflektor anzuwenden.

Fig. 34.

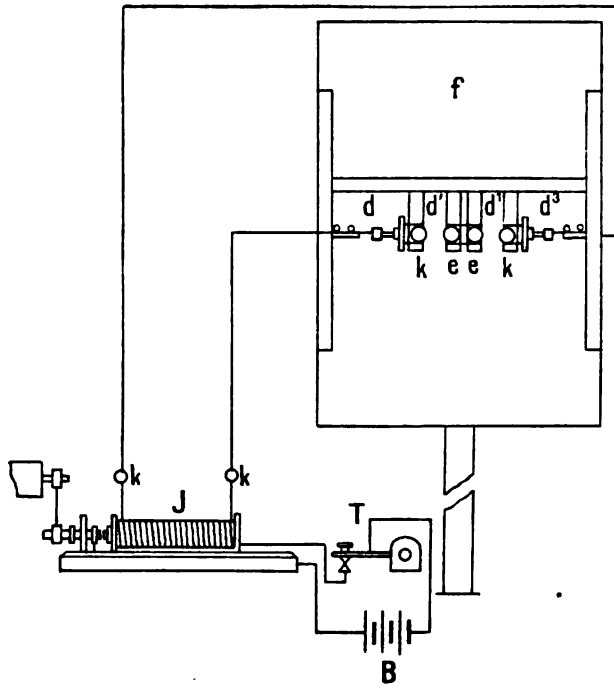
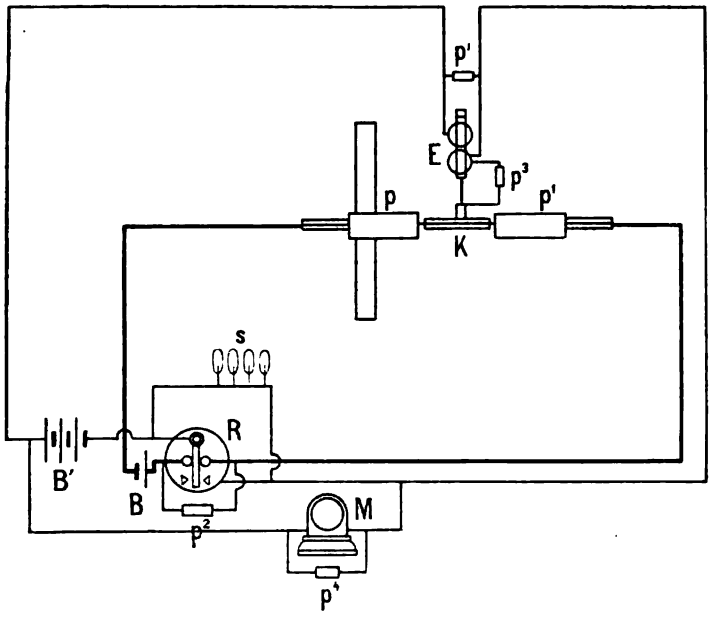


Fig. 34 und 35 stellen die Uebertragungs- und Empfangsapparate dar, wenn nur auf kurze Distanz telegraphiert werden soll. In denselben bezeichnet J die Induktionsspule, deren Sekundärwickelung mit den Knöpfen k k des Erregers verbunden ist, wogegen die Primärspule durch den Taster T mit der Batterie B in Verbindung steht. Die Unterbrechung des Primärstromes zum Zwecke der Erregung elektrischer Oscillationen erfolgt durch einen Unterbrecher, welcher durch einen Elektromotor in schnelle Rotation versetzt wird. Derselbe erscheint nur angedeutet. Der Erreger besteht aus zwei Paaren polierter Messing- oder Kupferkugeln k k und e e, welche in

Digitized by Google

Ebonitträgern d, d^1 d^1, d^3 ruhen. Die Entfernung zwischen den beiden Trägern d^1 d^1 kann durch hier nicht dargestellte Stellschrauben nach Bedarf reguliert werden. Um die beiden Kugeln e e wird ein Stück Pergament so gelegt, dass die beiden einander zugekehrten Halbkugelflächen derselben wie von einem Cylinder umschlossen scheinen. Der hierdurch zwischen den beiden Halbkugeln entstehende Hohlraum wird mit Vaseline ausgefüllt. Die Entfernung zwischen den beiden Kugeln k und e hängt von der erreichbaren Potentialdifferenz ab und beträgt bei einer Induktionsrolle mit 20 cm Funkenlänge 2,5 cm und zwischen

Fig. 35.



e e ca. 1 mm. Hinter diesem Erreger befindet sich ein cylindrischer Parabolspiegel aus Metall f, in dessen Fokus die beiden Kugeln e e eingestellt werden. Dieser Spiegel dient dazu, ein Strahlenbündel in bestimmte Richtung zu lenken, weil ohne diesen Spiegel die Wellen frei nach jeder Richtung ausstrahlen würden.

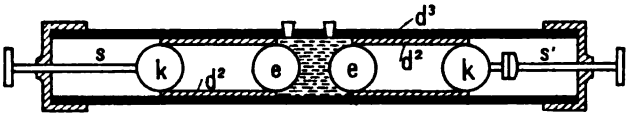
Um die Einstellung der beiden inneren Kugeln e e in den Fokus zu erleichtern, kann auch der in Fig. 36 dargestellte Sender oder Erreger verwendet werden. Jedes Kugelpaar k e ist in einer kurzen Ebonitröhre d^2, welche sich in einer etwas weiteren Röhre d^3 teleskopartig verschieben lässt, befestigt. Die beiden Kugeln k k sind je mit

Digitized by Google

einem Stäbchen s s^1 versehen, welche sowohl zur Verbindung mit der Leitung, als auch zur genauen Einstellung der Kugeln e e dient. Die Einstellung wird von rechts aus vorgenommen, indem sich das Stäbchen s^1 in die Hülse einschraubt. Um eine Drehung der rechtsseitigen Kugel k zu verhindern, ist das Stäbchen s^1 mit dieser Kugel statt starr durch ein Kugelgelenk verbunden. Der Raum zwischen den beiden Kugeln e e wird durch das äussere Rohr d^3 begrenzt. Der Zwischenraum zwischen diesen beiden Kugeln ist gleichfalls mit Vaselin ausgefüllt. Bei Anwendung grosser Potentialdifferenzen empfiehlt es sich, zwischen den grossen Kugeln mehrere kleine in entsprechenden Abständen zu verwenden.

Der Empfänger besteht aus dem Kohärer oder der Frittröhre K (Fig. 35), dessen beide Elektroden in ihrer aus der Glasröhre herausgehenden Fortsetzung mit je einer metallischen Platte p p^1 verbunden sind, welche dazu dienen, das System mit den übermittelten elektrischen Oscillationen abzustimmen, bezw. Resonanz hervorzurufen, weshalb die

Fig. 36.



Länge dieser Platten, bezw. deren gegenseitige Kapazität, vorher genau bestimmt werden muss.

Der Empfänger zeigt zwei Stromkreise. Der eine derselben umfasst den Kohärer mit den Platten p, p^1, die Batterie B und die Elektromagnete des Relais R. In den anderen Stromkreis ist die Batterie B^1, die Armatur des Relais R und der Erschütterer E, auch Dekohärer oder Entfritter genannt, eingeschaltet. Dies entspricht dem Linien- bezw. Lokalstromkreise eines gewöhnlichen Morsesystems. Da die Verminderung des Widerstandes in der Frittröhre auch nach vollendeter Einwirkung der elektrischen Wellen, somit auch nach deren Verschwinden andauert, muss deren Wirkung aufgehoben werden, was durch den Erschütterer bewerkstelligt wird, indem ein leises Durchschütteln der Feilspäne genügt, um den Widerstand derselben auf jene Höhe zu bringen, welche dem Strome der Batterie B keinen Durchgang mehr gestattet. Dieser Entfritter besteht in der Regel aus einer Art elektromagnetischer Glocke (Zimmerläutewerk), bei welcher der Fritter die Stelle der Glockenschale einnimmt. Das Entfritten erfolgt demgemäss automatisch und indirekt durch den Strom der Sendestation.

Digitized by Google

Ausser diesen Apparaten ist in den zweiten oder Lokalstromkreis noch der Empfangsapparat M, welcher die einlangenden Zeichen aufnimmt, im Nebenschluss eingeschaltet. Da die bei Kontaktunterbrechung am Klopfer, am Relais und am Empfangsapparate bei Oeffnung des Stromkreises auftretenden Entladungsfunken gleichfalls elektrische Wellen hervorrufen werden, welche, wenn auch von an und für sich geringer Intensität, doch wegen der kurzen Entfernung den Fritter beeinflussen und daher zur Wirksamkeit bringen könnten, sind zu diesen Apparaten, um derartige Funkenbildungen hintanzuhalten, bifilar gewickelte Nebenschlüsse p^2, p^3, p^4 von hohem Widerstande geschaltet. J ist ein Flüssigkeitswiderstand mit einer elektromotorischen Gegenkraft von 10 bis 15 Volt Batteriespannung und entspricht ungefähr einem Widerstande von 20000 Ohm. Er besteht aus mit angesäuertem Wasser angefüllten Glasröhren, in deren Boden Platindrähte eingeschmolzen sind.

Der Kohärer selbst ist von der in Fig. 23 dargestellten Einrichtung. Die Elektroden bestehen aus zwei Silberblöcken, die durch eingeschmolzene Platindrähte nach aussen abgeleitet werden. Als kohärentes Pulver werden Hartnickelfeilspäne, welchen ca. 4 % Silberfeile beigemengt ist, verwendet. Durch einen erhöhten Zuschuss an Silber soll der Kohärer zwar empfindlicher werden, doch wird er dann auch durch atmosphärische Elektrizität leichter beeinflusst. Eine dem Pulver beigefügte Spur von Quecksilber soll die Empfindlichkeit des Kohärers gleichfalls erhöhen, doch darf sich das Pulver durch das Quecksilber nicht zusammenballen, weshalb es sich empfiehlt, anstatt das Pulver mit Quecksilber zu mischen, amalgamierte Elektroden zu verwenden.

Die Dimensionen der Röhre sind: Länge 46 mm, innerer Durchmesser 2 bis 2,5 mm. Die beiden Elektroden, welche, um das Pulver nicht zu zerstreuen, enge an die Wandungen anliegen, haben eine Länge von 5 mm und beträgt der Zwischenraum zwischen denselben ungefähr 0,8 mm. Je kleiner dieser mit dem Metallpulver ausgefüllte Zwischenraum ist, desto empfindlicher soll der Kohärer werden. Das verwendete Metallpulver soll entgegen der Anschauung Branlys möglichst grob sein, und wird daher am besten mit einer Rauhfeile hergestellt. Die einzelnen Teile desselben müssen durch Sieben möglichst gleichförmig gemacht sein. Das Pulver soll zwischen den Silberblöcken so lose liegen, dass man beim Anklopfen an die Röhre eine freie Beweglichkeit desselben wahrnehmen kann.

Von Vorteil ist es, die Röhre zu evakuieren, doch erscheint dies durchaus nicht bedingt. Eine gute Röhre soll schon ansprechen,

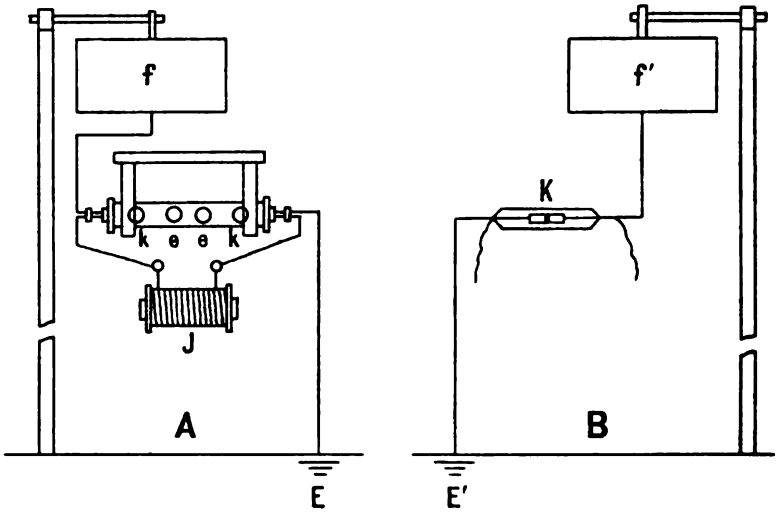
Digitized by Google

wenn ein gewöhnlicher Rasselwecker in der Entfernung von 2 bis 3 m arbeitet.

Für den Kohärerstromkreis darf nur ein Leclanché-Element benützt werden und denselben höchstens ein Strom von 1 Milliampère durchfliessen. Bei Anwendung einer höheren E.M.K. als 1,5 Volt ist es leicht möglich, dass eine Verstärkung des Stromes ohne Einwirkung der elektrischen Wellen erfolgt.

Für weitere Distanzen wird von Marconi die in Fig. 37 schematisch dargestellte Anordnung und zwar mit günstigstem Erfolge verwendet. In dieser Darstellung, bei welcher mit A die Gebe- und mit B

Fig. 37.



die Empfangsstation bezeichnet ist, erscheinen die sowohl für diese als die vorhergehend beschriebene Anordnung gleichbleibenden Nebenapparate weggelassen.

Bei dieser Anordnung ist einer der Knöpfe k mit der Erde E, der andere hingegen mit einer an einer Stange von der Erde isoliert aufgehängten Metallplatte f verbunden. In der Empfangsstation ist der Kohärer K gleichfalls einesteils mit der Erde E^1, anderenteils mit der in gleicher Weise wie in der Gebestation aufgehängten Platte f^1 verbunden. Je grösser diese Platten und je höher dieselben aufgehängt sind, desto grösser ist die Entfernung, über welche gesprochen werden kann. Man hat hier die Anwendung des Oscillators von Hertz, nach welchem die beiden Enden des Erregers mit zwei Kapazitätsflächen

Digitized by Google

verbunden sind. Es bildet nämlich hier die erhöhte Platte den einen, die Erde den anderen Belag eines Kondensators, mit der zwischenliegenden Luft als Dielektrikum. Die beiden erhöhten Platten andererseits sind wieder einem Kondensator zu vergleichen, und ist es einleuchtend, dass die Kapazität dieser beiden Platten in dem Masse anwächst, in welchem die Kapazität jeder Platte gegenüber der Erde abnimmt, je höher also diese Platten über dem Erdboden aufgehängt sind. Nach Marconis Angaben soll bei einer Höhe der Drähte von 6 m bis auf 1,6 km, bei einer Höhe derselben von 12 m bis auf 6,4 km, bei 24 m bis auf 25,5 km durch den Raum telegraphiert werden können, doch ist es im letzteren Falle einmal gelungen, über 29 km weit zu sprechen. Für die Strecke Folkestone-Boulogne, welche 51 km beträgt, sollen die vertikalen Drähte 35 m hoch sein. Man ersieht hieraus, dass die Entfernung, bis zu welcher die elektrischen Wellen noch wirksam übertragen werden können, mit der Höhe der vertikalen Drähte, und zwar mehr als im direkt proportionalen Wege, anwächst.

Nach diesen Erscheinungen könnte angenommen werden, dass die Erhöhung der Drähte in Bezug auf die erzielbare Fernwirkung auf den gleichen Grundwirkungen beruht, wie solche für die elektromagnetische Induktionsmethode von Preece und in Bezug auf die elektrostatische Induktionsmethode von Edison nachgewiesen wurde, und man bei dieser Art der Telegraphie gleichfalls mit direkten Induktionswirkungen und nicht mit Wellenbewegungen allein zu rechnen hat. Aus anderen Begleiterscheinungen, namentlich jedoch daraus, dass zwischen Sender und Empfänger liegende Hindernisse, wie Bodenerhebungen, Häuser etc. die Wirkungen nicht oder nur in geringem Masse beeinflussen, lässt sich, worauf später noch zurückgekommen werden soll, die Wirkungsweise des erhöhten Drahtes nur in einer mit der Wellentheorie in Einklang zu bringenden Weise erklären.

Die vorher beschriebenen Apparate für die Marconische Wellentelegraphie wurden den ursprünglichen Patentbeschreibungen entnommen. Mittlerweile ist es seinen und seiner Assistenten rastlosen Bemühungen gelungen, an diesen Apparaten eine Reihe von Verbesserungen durchzuführen, welche dieselben viel wirksamer gestalten.

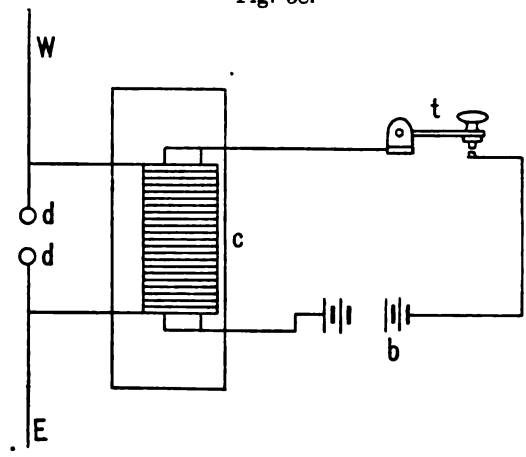
Für grosse Entfernungen und für den Fall, dass die Signale nicht in einer bestimmten Richtung erfolgen sollen, wird die Vorrichtung in Fig. 38 als Geber verwendet. In diesem Falle werden die Sekundärklemmen des Induktoriums C mit zwei kleinen Kugeln d d verbunden, von welchen die eine an die Erde gelegt ist und die andere zu dem vertikalen Luftleiter W führt. Diese beiden kleinen Kugeln sind in

Digitized by Google

möglichst weitem Abstande eingestellt, so dass die Funkenstrecke eine ziemliche Länge besitzt.

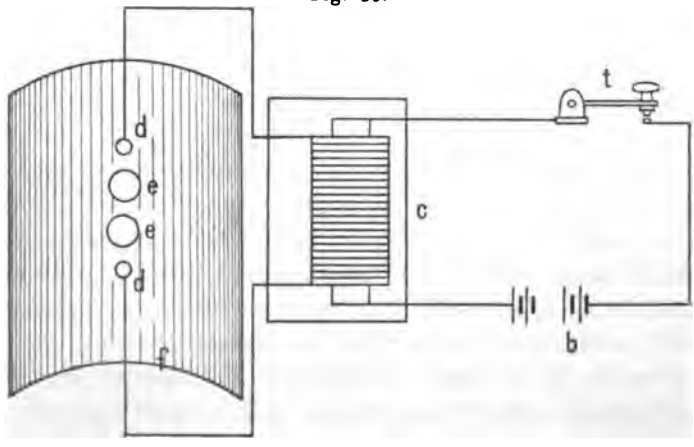
Soll jedoch den elektrischen Oscillationen eine bestimmte Richtung gegeben werden, so bedient sich Marconi des Erregers von

Fig. 38.



Righi, welcher in die Brennlinie eines halbcylindrischen Parabolspiegels f (Fig. 39) eingestellt ist. In diesem Falle wird von einer Verbindung der äusseren Kugeln mit einem Luftleiter und der Erde

Fig. 39.



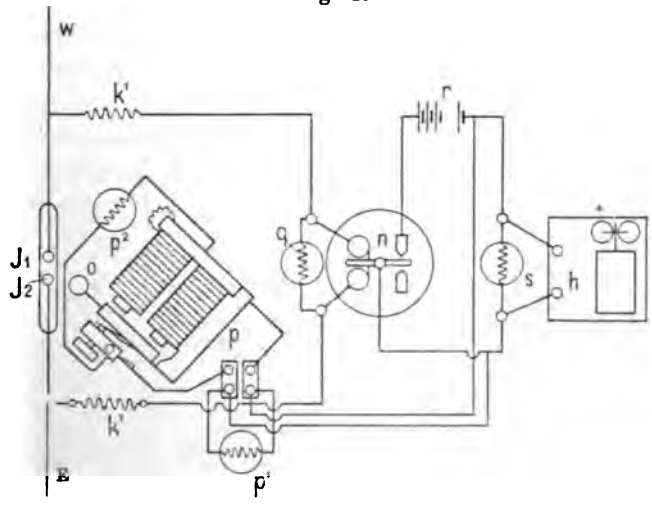
Abgang genommen. Das Hervorrufen der elektrischen Wellen und damit der Zeichen im Empfänger wird durch Niederdrücken und Hochheben des Telegraphentasters t bewirkt, welcher hierbei den Strom-

Digitized by Google

kreis der Batterie b, in welchen die Primärs le des Induktoriums geschaltet ist, schliesst oder unterbricht. Zur Erzielung der erforderlichen häufigen Stromunterbrechung gelangt ein automatischer, hier nicht dargestellter Stromunterbrecher zur Anwendung. In neuerer Zeit hat man auch den Wehneltschen Stromunterbrecher in der abgeänderten Form von Caldwell zu diesem Zwecke, jedoch, wie es scheint, nicht mit dem erwarteten Erfolge verwendet.

Die Anordnung der Empfangsapparate für diese beiden Fälle ist aus den Fig. 40 und 41 zu ersehen. Im ersteren Falle ist der Kohärer $J_1 J_2$ mit der Auffangstange w und der Erde E verbunden. p bezeichnet hier den Dekohärer, n das Empfangsrelais, h den Auf-

Fig. 40.



nahmeapparat und r die Batterie. Werden Reflektoren benützt, so entfällt die Verbindung mit der Auffangstange und der Erde, hingegen werden die Ableitungen von den beiden Elektroden des Kohärers $J_1 J_2$ mit zwei Metallstreifen k k verbunden. Durch diese beiden Metallstreifen sollen Sender und Empfänger gegenseitig so abgestimmt werden können, dass ein bestimmter Empfänger nur auf die von einem mit demselben abgestimmten Sender gegebenen Zeichen anspricht. Die Länge dieser Streifen richtet sich nach der angewendeten Elektrizitätsquelle, nach der Wirksamkeit des Erregers und nach der Entfernung und muss durch genaue Versuche empirisch ermittelt werden.

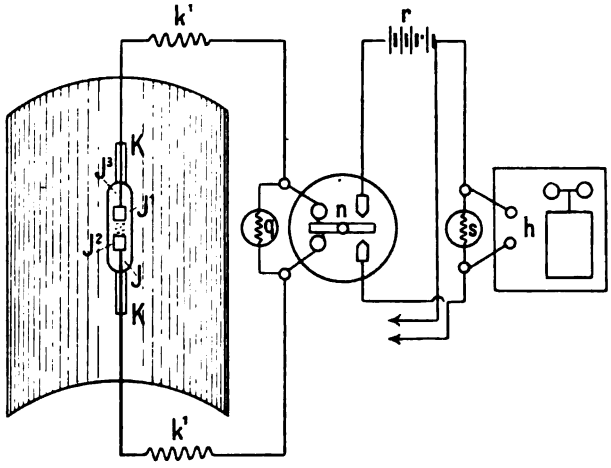
Bei Verwendung von Reflektoren ergab sich, dass der Empfänger bei einer Entfernung von 28 km nur um ca. 15 m nach rechts oder

Digitized by Google

links verschoben werden durfte, um noch aufnahmsfähig zu bleiben, woraus auf die Wirksamkeit der Reflektoren ein Schluss gezogen werden kann. Es scheint hier das enge Zusammenhalten der reflektierten elektrischen Wellen mehr Einfluss darauf auszuüben, dass Signale von einem bestimmten Punkte aus nur an einen bestimmten Empfänger übertragen werden können, als das dermalen immerhin noch sehr prekäre Abstimmen zwischen Erreger und Kohärer.

Bei der gesamten Empfangsanordnung sind sämtliche elektromagnetischen Vorrichtungen durch in Nebenschluss geschaltete induktionslose Widerstände gegen Funkenbildung und Rückschläge geschützt. Zwischen Kohärer und Relais sind kleine Drosselspulen $k^1 k^1$ einge-

Fig. 41.



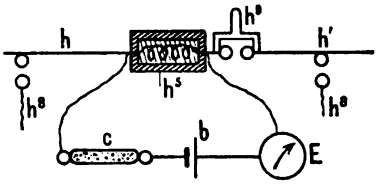
schaltet, die den von den Wellen ausgehenden Strom zwingen, in den Kohärer zu fliessen. Von den in der ersten Anordnung vorgesehenen, an den erhöhten Stangen befestigten Metallplatten oder Kapazitätsflächen wird nunmehr Umgang genommen.

Lodges Einrichtungen für die Wellentelegraphie. Wiewohl in den Grundprinzipien mit den Einrichtungen Marconis übereinstimmend, hat Lodge dennoch eine Reihe von Verbesserungen durchzuführen versucht, über welche, wenn selbe auch dem Augenschein nach eine erhöhte Wirksamkeit versprechen, ein Urteil noch ausständig ist, weil Versuche mit denselben in grösserem Massstabe noch nicht durchgeführt wurden, oder wenigstens über deren Durchführung und Ergebnisse nichts verlautbar wurde.

Digitized by Google

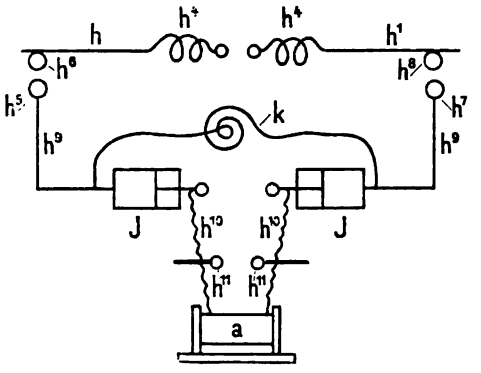
Fig. 42 stellt einen nach den Anordnungen von Lodge kombinierten Geber und Empfänger dar. In demselben sind h^8 Drähte, welche zu einem Induktionsapparate von hohem Potentiale führen. $h\,h^1$ sind starke Drähte, welche als Kapazitätsflächen funktionieren, und h^5 ist eine entsprechende abgestimmte Selbstinduktionsspule, welche in Isoliermasse eingebettet wird. Die Funkenstrecke bei h^9 ist für den Fall, als das Instrument für den Empfang eingerichtet werden soll, durch eine Art Wechsel h^9 überbrückt, welcher abgestellt wird, sobald eine Depesche zur Entsendung gelangt. Wie zu ersehen ist, gelangt hier, wenn auch in etwas anderer Form, die Anordnung der Funkenstrecken, wie solche von demselben Erfinder ursprünglich angegeben wurde, zur Anwendung. C stellt bei dieser Anordnung den Kohärer, b die Lokalbatterie und E das Empfangsinstrument vor.

Fig. 42.



Die in Fig. 43 zur Anschauung gebrachte Anordnung bezweckt durch Anwendung von Leydener Flaschen oder sonst irgend passender

Fig. 43.



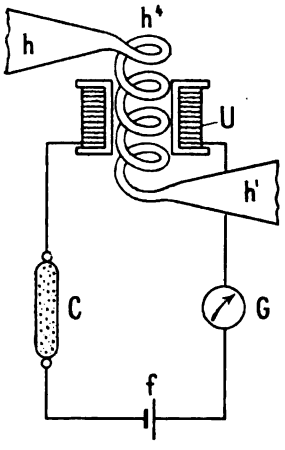
Kondensatoren ein möglichst hohes Potential zu erreichen. Zu diesem Zwecke führen die beiden, von der Sekundärwickelung des Induktoriums a abgehenden Drähte h^{10} zu den inneren Belegen der beiden Leydener Flaschen J J. Die äusseren Belege derselben führen vermittelst der beiden Drähte h^9 zu den Erregerknöpfen h^5, h^7. Dementsprechend wird die von dem Erreger zwischen den Kugeln $h^5\,h^6$, $h^7\,h^8$, $h^4\,h^4$ überspringende Elektrizität von den äusseren Belegen

Digitized by Google

der Leydener Flaschen abgeleitet. Die zwischen den beiden Drähten h^{10} angeordnete Funkenstrecke h^{11} hat den Zweck, das Entstehen der Entladungen in dem gesamten Erregerstromkreise hervorzurufen. Die beiden äusseren Belege der Leydener Flaschen sind ausserdem noch durch eine Induktionsspule hoher Selbstinduktion k verbunden. Mit dieser Induktionsspule wird bezweckt, eine volle Ladung der beiden Flaschen zu ermöglichen. Dieselbe wirkt bei den Entladungen allerdings wie ein Nebenschluss, verhindert aber in keiner Weise das Ueberspringen der Funken in dem eigentlichen Erreger.

In Fig. 44, welche eine geänderte Empfangsanordnung darstellt, ist die Abstimmungsspule h^4 des mit den beiden Flügeln $h\,h^1$ versehenen Resonators von einer Sekundärspule U umgeben, welche einen Teil des Kohärerstromkreises bildet, so dass derselbe nicht direkt durch die einlangenden elektrischen Wellen, sondern sekundär durch die in der Spule U induzierten Wellenströme angeregt wird. Der hiermit angestrebte Zweck ist, den Resonator, welcher die einlangenden elektrischen Wellen aufnimmt, freier elektrisch vibrieren zu lassen, als dies bei Verbindung desselben mit Drähten, welche stets eine gewisse Störung verursachen, möglich wäre. Der erzielte Effekt ist ähnlich jenem, welcher durch die Vergrösserung des Gewichtes, sohin auch des Trägheitsmomentes eines Schwungrades hervorgerufen wird, indem bei bestimmter Winkelgeschwindigkeit die Zahl der Umdrehungen, welche selbes, nachdem die treibende Kraft zu wirken aufhört, vollzieht, um so grösser wird, je schwerer das Rad ist.

Fig. 44.



Viel besser erklärt sich noch die Wirkung der Induktionsspule aus einem Vergleiche mit tönenden Körpern. Körper von geringer Masse, welche ihre Bewegung leicht auf die Luft übertragen, wie beispielsweise gespannte Membranen oder Saiten, werden leicht in sympathische Schwingungen versetzt und sind die Grenzen der Schwankungen in der Tonhöhe, welche diese Anregungen zu erzeugen vermag, bei diesen Körpern ziemlich bedeutende. Massive elastische Körper, wie Glocken, Platten etc. sind dagegen nicht so leicht zu erregen und ist es bei denselben Bedingung, dass die Tonhöhe, welche derartige Schwingungen erregen soll, dem Eigenton dieser Körper mit

Digitized by Google

grosser Genauigkeit angepasst werde. Dafür werden aber diese Körper, einmal in Schwingung versetzt, viel länger fortschwingen, als die leichten und leicht erregbaren Körper. Dieses Beharrungsvermögen von massiven elastischen Körpern und die Notwendigkeit der genauen Regulierung der Tonhöhe, um solche Körper in sympathische Schwingungen zu versetzen, stimmt genau mit dem Verhalten eines elektrischen Stromkreises überein, in welchem eine Induktionsspule eingeschaltet ist. Die Abstimmung des Aufnehmers der elektrischen Schwingungen muss in diesem Falle viel genauer festgestellt werden, dafür dauern aber die Oscillationen viel länger an, als wenn diese Induktionsspule weggelassen wird.

Erklärung des Entstehens der elektrischen Radiation bei der Wellentelegraphie. Die Erscheinung bei der Marconischen Telegraphie, dass die Entfernung, über welche telegraphiert werden kann, mit dem Quadrate der Länge der vertikalen Stangen W der Aufnahme- und Gebestationen (siehe Fig. 37 und 38) wächst, führt leicht zur Annahme, dass der erzielte Effekt nur auf statische oder elektromagnetische Induktion zurückzuführen sei. Zieht man jedoch die Entfernungen in Betracht, bis auf welche man mittels der Marconischen Einrichtungen noch Nachrichten zu verbreiten vermag, und zwar bei Anwendung relativ geringer elektromotorischer Kräfte, so zeigt sich, dass dies trotz der enormen Empfindlichkeit des als Empfänger verwendeten Kohärers oder Fritters nicht angängig ist. Sowohl die statische als die elektromagnetische Induktion ist in Bezug auf ihre Wirkungen als ein Volumeneffekt zu betrachten, d. h. die Wirkungen verringern sich im umgekehrten kubischen Verhältnisse zu den Entfernungen. Bei der Radiation oder Ausstrahlung, welche nur wellenförmig erfolgt, vermindert sich jedoch die Wirkung nur im umgekehrten quadratischen Verhältnisse zur Entfernung, so dass sich die erhöhten Wirkungen bei der Marconischen Telegraphie nur dadurch erklären lassen. Da jedoch nach der allgemeinen Anschauung elektrische Wellen, welche sich frei im Raume fortpflanzen, nur innerhalb der Funkenstrecke des Erregers erzeugt werden, steht dies mit der erhöhten Wirkung durch die vertikalen Drähte nicht recht im Einklange und muss daher mit dieser Anschauung gebrochen und den erhöhten Drähten eine gewisse Mitwirkung bei der Entstehung elektrischer Wellen zuerkannt werden.

J. E. Taylor hat nun, um das Mysterium der drahtlosen Telegraphie ein wenig aufzuhellen, eine interessante Studie veröffentlicht, welche thatsächlich geeignet ist, die hierbei zu Tage tretenden Er-

Digitized by Google

scheinungen in natürlicher Weise zur Erklärung zu bringen. Von der Thatsache ausgehend, dass sich durch besondere Hilfsmittel die Entfernung der Zeichenvermittelung noch vergrössern lässt, insbesondere dann, wenn man parabolische Reflektoren verwendet, schliesst er, dass sich durch Erzeugung von sehr kurzen Wellen, wenn Wellenbewegung angenommen wird, die Entfernung noch erweitern lassen muss. Wäre dem aber nicht so, so müsste die Clerk Maxwellsche elektromagnetische Theorie des Lichtes unbedingt hinfällig werden, weil die Fundamentalgesetze der elektromagnetischen oder statischen Induktion mit jenen der Lichtradiation schon vom Beginne an differieren. Die Intensität der von einem Punkte aus erregten Lichtradiation ist umgekehrt dem Quadrate der Entfernung. Das will so viel besagen, dass die während einer gegebenen Zeitperiode erfolgende gesamte Ausstrahlung von einem Punkte sozusagen körperlich nach auswärts wandert und, einmal erregt, unabhängig von der erzeugenden Quelle wird. Es ist dies genau so, wie bei einer Schallwelle, welche in der freien Luft fortwandert und sich immer mehr ausdehnt, dabei in ihrer Wirkung zwar schwächt, aber eigentlich, wenn sie auf keine Hindernisse stösst, niemals verschwindet. Eine solche Welle wandert stets unabhängig von dem, was hinter ihr vorgeht, weiter und unabhängig davon, ob die Erregerquelle zu wirken aufgehört hat oder nicht. Sie wird, wenn sie keinem Hindernisse begegnet, Tausende von Jahren ihren Weg fortsetzen.

Bei elektrischen Induktionseffekten, seien selbe statisch oder elektromagnetisch, dehnt sich das gesamte Feld als solches zwar aus, pflanzt sich aber als ein Ganzes nicht fort: Sobald die Quelle, welche dieses Feld erzeugt hat, verschwindet, wird auch das Feld zerstört und nichts geht weiter.

Licht hingegen lässt sich parallel übertragen, reflektieren, brechen und polarisieren, es erzeugt Schatten von undurchsichtigen Gegenständen, welche es auf seinem Wege trifft. Alle diese Effekte können auch in ganz ähnlicher Weise, wie dies Hertz überzeugend nachgewiesen hat, durch elektrische Strahlung, niemals aber durch elektromagnetische Induktion hervorgerufen werden.

Vor Faraday wurden magnetische und elektrische Effekte nicht mit dem den Erreger derselben umgehenden Medium in Verbindung gebracht, sondern es wurde angenommen, dass eine Menge eines unsichtbaren und unwägbaren Fluidums ohne irgend eine Zwischenwirkung die Kraft habe, die Effekte in die Ferne zu vermitteln.

Faraday wies jedoch nach, dass das zwischen zwei Leitern

Digitized by Google

liegende Dielektrikum hierbei die führende Rolle spielt und brachte auf Grund seiner Untersuchungen die gleichfalls hypothetischen Begriffe der elektrischen Polarisation und der Kraftlinien zur Einführung.

Maxwell, Poynting und Hertz gelang es, diese Kraftlinientheorie noch zu erweitern und nachzuweisen, dass sich mit derselben alle elektrischen und magnetischen Erscheinungen, die wir bisher zu beobachten Gelegenheit hatten, in ausreichender Weise erklären lassen, so dass diese Theorie als die einzige, welche der dermaligen Entwickelung der Lehren von der Elektrizität und dem Magnetismus vollkommen entspricht, noch vollkommen zu Kraft besteht.

Poynting wies ferner nach, dass die Energieübertragung in einem Stromkreise nicht durch den Leiter selbst, sondern durch das denselben umgebende Dielektrikum bewirkt wird.

Hertz zeigte weiters, dass Effekte, sowohl magnetische wie elektrische, von den Leitern gänzlich unabhängig gemacht, d. h. dass sie im freien Raume selbst bei Abwesenheit von Leitern hervorgerufen werden können. Dies ist es eben, was die elektrische Strahlung bildet.

Soll ein von jedem Leiter unabhängiges elektrisches Feld existieren können, so ist es unbedingt notwendig, dass die elektrischen Kraft- oder Polarisationslinien, oder wie selbe vielleicht richtiger bezeichnet werden, die Spannungslinien in sich selbst geschlossen werden.

Da nun elektrische Spannungslinien allgemein nur mit ihren beiden Enden von einem Leiter ausgehend gedacht werden, handelt es sich darum, den Nachweis zu liefern, wieso diese Spannungslinien auch in sich geschlossen und sohin selbständig gemacht werden können.

Solche von einem Leiter ausgehende elektrische Spannungslinien können nun thatsächlich abgeschnitten, unterteilt und wieder zusammengefügt, ferner gleich elastischen Fäden in unbestimmtem Grade ausgedehnt werden und sich sodann wieder zusammenziehen und verkürzen. Alle diese Wirkungen können an einer gewöhnlichen Influenzmaschine oder an einem Elektrophor beobachtet werden und hängt der Multiplikations- oder Verdoppelungsprozess dieser Maschinen in einem gewissen Grade von den angegebenen Erscheinungen ab.

Um nun aus diesen Erscheinungen die für die Entstehung in sich geschlossener Spannungslinien notwendigen Folgerungen ziehen zu können, sei vorerst der einfachste Fall, wie eine solche Spannungslinie in zwei Teile geschnitten und wieder zusammengefügt werden kann, in Betracht gezogen.

Digitized by Google

Bringen wir an einer Seite des zwischen den beiden Kugeln A, D (Fig. 45) bestehenden elektrischen Spannungsfeldes ein metallisches Blatt M M¹ nahe zu den beiden Metallkugeln, so verursacht dies eine neue Verteilung im Felde. Eine Anzahl der Linien verläuft direkt von einer Kugel zu der anderen, andere Linien hingegen von den Kugeln zum Metallblatte. Betrachtet man eine dieser Linien A B C D, so zeigt sich, dass sich selbe, weil die Linien durch das Metallblatt nicht hindurchgehen, in zwei Teile, A B und C D, geteilt hat. Wird jedoch, wie dies Fig. 46 darstellt, das Blatt M M¹ hinreichend weit weggezogen, um die Wiedervereinigung solcher getrennter Linien zu ermöglichen, so zeigt sich, dass die Linie A B C D wieder vereinigt wurde, während andere Linien noch getrennt erscheinen, bis das Blatt

Fig. 45.

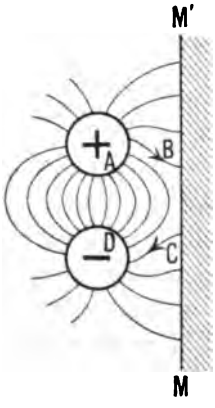
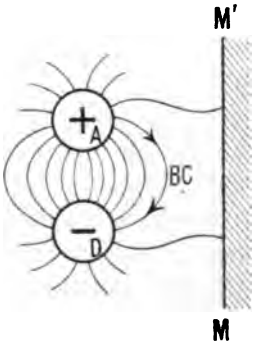


Fig. 46.



endlich so weit entfernt ist, dass wieder alle Linien von Kugel zu Kugel verlaufen. Man erkennt hieraus, dass sich derartige Linien trennen und wieder vereinigen. Ist man nun durch irgend welche Mittel in der Lage, auch die beiden Enden A und D einer solchen Linie A B C D zur Vereinigung zu bringen, so müsste sich eine vollkommen in sich geschlossene Linie bilden, welche unabhängig von dem, was sich in den leitenden Kugeln ereignet, in dem Dielektrikum existieren würde.

Und gerade das ist es, was in einem Hertzschen Oscillator vor sich geht. Die Rapidität der einzelnen hin und her gehenden Schwingungen reisst sozusagen die beiden Enden der Spannungslinien von den Kugeln los, worauf sich dieselben zu einer geschlossenen Linie vereinigen.

Es lässt sich dies einigermassen mit der Bewegung eines Kolbens

Digitized by Google

in einem Cylinder vergleichen, welcher, wenn er in raschem Wechsel auf- und abwärts geht, in der denselben umgebenden Flüssigkeit, wie man dies bei jeder Buttermaschine oder noch besser bei einer zähen Flüssigkeit, welche gleichmässig konsistent gemacht werden soll, ersehen kann, Flüssigkeitsringe loslöst, die sich in der Flüssigkeit wellenförmig ausbreiten.

Diese Selbstschliessung der Kraftlinien findet immer statt, wenn ein elektrischer Stromkreis irgend welcher Gattung im Vergleiche zu seinen Dimensionen in hinreichend starke elektrische Oscillationen versetzt wird, und findet dies schon in sehr geringem Grade bei den oscillatorischen Entladungen einer Leydener Flasche, ja selbst bei den bei einem gewöhnlichen Selbstunterbrecher auftretenden Funken statt.

Nicht immer aber ist das Entstehen solcher in sich geschlossener Kraftlinien mit elektrischer Strahlung verbunden. So müssen in einem stromdurchflossenen Solenoide die elektrischen Kraftlinien in sich geschlossen sein, weil sonst das unveränderliche Gesetz, dass die elektrischen Linien im rechten Winkel zu den magnetischen Linien und beide senkrecht zu der Richtung ihrer Fortpflanzung stehen, nicht eingehalten würde. Thatsächlich kann dieses kreisförmige elektrostatische Feld in diesem Falle sichtbar gemacht werden, indem man einige wenige Windungen isolierten Drahtes um eine luftleer gemachte Glasbirne legt und eine entsprechend stark geladene Leydener Flasche durch diese Windungen entladet. Es wird im Inneren der Glasbirne ein leuchtender Kreis sichtbar, der nur das Ergebnis eines in der Birne erzeugten, hinreichend starken, elektrischen Feldes sein kann. Nach J. J. Thomson werden in diesem Falle die in sich geschlossenen Spannungslinien nicht gestört, aber sie zersplittern sich in eine Unzahl kleiner Kreise von molekularen Dimensionen.

Poynting geht in seiner Theorie der Energieübertragung in einem elektrischen Stromkreise von der Anschauung aus, dass der Strom als solcher in einer Bewegung der Spannungslinien, welche mit ihren beiden Enden längs der Oberfläche des Leiters gleiten, besteht. Wird nach dieser Anschauung ein Hertzsches System in Oscillationen versetzt, und solche Oscillationen entstehen bei jeder Entladung, wenn die gegenseitigen Beziehungen zwischen Widerstand, Kapazität und Selbstinduktion in richtigem Verhältnisse stehen und die Entladung plötzlich und scharf vor sich geht, so erhält man längs des Entladungssystemes rapid reversierende Ströme, bei welchen die Enden der Spannungslinien, welche das Kraftfeld bilden, über die Oberflächen des Leiters nach einwärts gleiten.

Digitized by Google

Um nun den in dem Hertzschen Kugelradiator sich abspielenden Vorgang zu veranschaulichen, soll derselbe an den Fig. 47 bis 49 verfolgt werden. Fig. 47 zeigt den Zustand des elektrischen Feldes vor der Entladung, in welchem nur elektrische Spannungslinien existieren. Erfolgt die Entladung zwischen den Kugeln des Radiators, so wird vorerst angenommen, dass ein Strom von dem oberen Teile desselben nach dem unteren fliesst. In der Sprache von Poynting bedeutet dies, dass die positiven Enden der Linien nach abwärts, die negativen hingegen nach aufwärts gleiten, wobei sich die äusseren Partien derselben nach einwärts bewegen und sich so die Linien zusammenziehen. Infolge dieser Bewegung treffen sich die positiven und negativen Enden der Linien auf halbem Wege, indem sie den Leiter verlassen. Da sich diese Enden nicht kreuzen können, vereinigen sie sich und bilden in sich geschlossene Spannungslinien. Dieser Vorgang

Fig. 47.

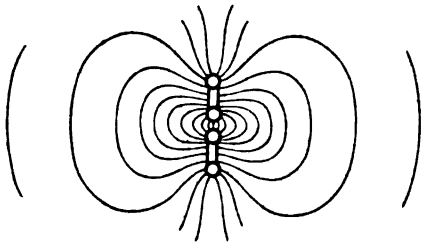
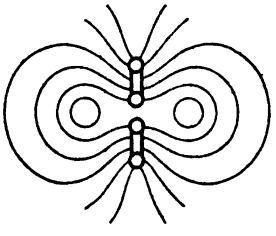


Fig. 48.



ist in Fig. 48 dargestellt, wobei sich jedoch immer vor Augen zu halten ist, dass die Linien rechts und links des Leiters getrennte Spannungslinien sind und sich nur die rechtsseitigen Linien nach rechts, die linksseitigen Linien nach links zu geschlossenen Spannungslinien vereinigen werden.

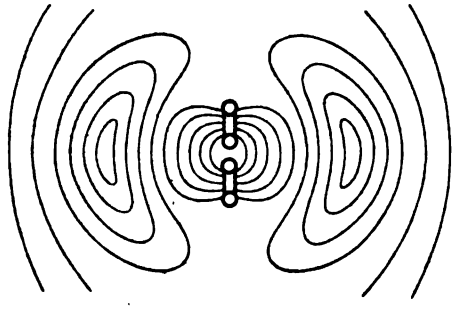
Ebenso wie nun jedes sich bewegende oder wechselnde magnetische Feld elektrische Spannungslinien hervorruft, ebenso wird die Bewegung der Spannungslinien ein magnetisches Feld im rechten Winkel zur Bewegungsrichtung und im rechten Winkel zu den elektrischen Linien erzeugen und bedingt dies die Form von magnetischen Kreisen um das System.

An dem Ende einer halben Oscillation oder dem vierten Teile einer Periode sind die mit dem Leiter verbunden gewesenen elektrischen Linien verschwunden und nimmt deren Stelle das magnetische Feld ein, während sich die in sich geschlossenen elektrischen Linien im Raume verbreiten. In diesem Zeitpunkte ist die Stromstärke an ihr

Digitized by Google

Maximum angelangt. Der nächste Vorgang ist nun der, dass sich die magnetischen Kreise um den Leiter herum nach einwärts zusammenziehen und durch diese Bewegung ein neues elektrisches Feld, von der entgegengesetzten Richtung wie früher, erzeugen. In der weiteren Entwickelung findet eine vollkommene Umkehrung des ursprünglichen elektrischen Feldes statt und das magnetische Feld verschwindet neuerdings. Dies ist die in Fig. 49 dargestellte Lage, welche nach Vollendung einer Oscillation oder einer halben Periode eintritt. Sodann beginnt derselbe Prozess von neuem und immer mehr und mehr in sich geschlossene elektrische Kraft- oder Spannungslinien lösen sich so lange von dem Felde los, bis die Energie des Systems verschwunden oder die verbleibende Energie nicht mehr gross genug ist, den Funken zwischen der Funkenstrecke aufrecht zu erhalten.

Fig. 49.



Die von dem Felde abgerissenen Teile pflanzen sich nun nach auswärts fort und nehmen mit ihrer Ausdehnung immer mehr und mehr eine sphärische Form an, wobei sie jedoch stets die gleiche Stärke der Schale behalten. Diese Fortpflanzung der in sich geschlossenen elektrischen Kraftlinien ist es, was die elektrische Radiation oder Strahlung bedeutet. Die Geschwindigkeit, mit welcher diese Teile wandern, ist genau dieselbe wie die des elektrischen Lichtes.

In den vorstehenden Fig. 45 bis 49 sind bloss die elektrischen Charakteristiken dieser Spannungslinien, nicht aber auch das dieselben begleitende magnetische Feld dargestellt. In Wirklichkeit ist jedoch mit jeder dieser in sich geschlossenen Spannungslinien ein magnetisches Feld von der gleichen Phase im rechten Winkel zu derselben verbunden. Die losgelösten Partien des elektrischen Feldes wandern nun strahlenförmig als sich stets ausdehnende Schalen nach auswärts und oscillieren oder vibrieren in sich nicht, verursachen aber in jedem

Digitized by Google

Leiter, welchem sie begegnen, Oscillationen. Solche Leiter schneiden Stücke aus diesen Linien, wie dies in Fig. 45 und 46 dargestellt ist, heraus und produzieren elektromagnetische Schatten, die bei langen Wellen allerdings nicht recht hervortreten, bei kurzen Wellen hingegen, unabhängig von der Entfernung der Erzeugungsquelle, scharf gekennzeichnet sind.

Soferne nun bei der Marconi-Telegraphie der Reflektor ohne den vertikalen Draht zur Anwendung gelangt, lässt sich vorstehende Erklärung über die Entstehung der elektrischen Wellen auf die hier wahrnehmbaren Erscheinungen anwenden. Für die Wirkungen des vertikalen Drahtsystemes erweist sich jedoch diese Erklärung als unzureichend. Um diese Wirkung einigermassen erklären zu können, muss auf die Experimente von Hertz und Lodge über die Fortpflanzung von Wellen in Leitern zurückgegriffen werden.

Die Hertzsche Anordnung ist dieselbe, wie solche bereits beschrieben und in Fig. 27 dargestellt wurde. Es werden bei der Entstehung solcher elektrischer Wellen in Drähten elektrische Felder von der in dieser Figur durch die ovalen Linien dargestellten Form erzeugt und längs des Drahtes fortgepflanzt. Die so dargestellten Spannungslinien sind aber nicht in sich selbst geschlossen, sondern endigen mit ihren beiden Enden am Leiter, so dass jedes Halboval oberhalb und unterhalb des Leiters als Spannungslinie anzusehen ist. Wiewohl nicht in sich geschlossen, sind sie doch als elektrische Wellen zu betrachten, welche sich längs des Leiters mit der Geschwindigkeit des Lichtes bewegen, dort am Ende desselben reflektiert werden und, wenn die Länge des Drahtes einer Mehrzahl der Wellenlängen entspricht, durch Interferenz stehende Wellen mit zahlreichen Knotenpunkten bilden. Die in Fig. 28 dargestellte Anordnung von Lodge lässt das thatsächliche Vorhandensein solcher stehender Wellen experimentell nachweisen.

Würde nun der Draht (Fig. 27), anstatt isoliert zu werden, an die Erde angelegt, so bildet die Erde die Fortsetzung des Leiters und die Spannungslinien werden in analoger Weise längs der Oberfläche der Erde fortgleiten, daher auch allen Erhebungen derselben folgen und sich an selbe anschmiegen, ebenso wie die Wellen einem in eine Schlinge gebogenen Drahte genau in dessen Windungen folgen werden.

Betrachtet man nun die in Fig. 28 dargestellte Anordnung und ändert dieselbe so ab, dass nur eine Leitung angewendet wird (Fig. 50), während die zweite Leitung mit der Erde in Verbindung steht, so müssen bei Entladungen gleichfalls Wellen entstehen. Genau betrachtet

Digitized by Google

ist diese Anordnung nahezu identisch mit der Marconischen Anordnung. Der isolierte vertikale Draht bildet hier den einen Beleg, die Oberfläche der Erde den zweiten Beleg der Flasche, während der Erdkörper selbst den Platz des verbundenen Leiters einnimmt. Hierdurch ist in Marconis System nicht nur allen Bedingungen für oscillatorische Entladungen, sondern auch für die Erzeugung der mächtigsten elektrischen Wellen entsprochen. Anstatt dass bei derselben das elektrische Feld aber durch die Leydener Flasche begrenzt wird, breitet es sich, wie in Fig. 51 dargestellt ist, weit in dem umgebenden Raume aus. Wenn die Entladung stattfindet, trennen sich die Enden der Spannungslinien von dem vertikalen Drahte und gehen zur Erde, und bilden hier ähnliche Wellen wie die Hertzschen Wellen, welche sich längs der Drähte erzeugen. In diesem Falle gehen die Wellen, in der Form von konzentrischen Halbkreisen, nach allen Richtungen hin strahlenförmig aus, verbreiten sich jedoch nicht im ganzen Raume, sondern wandern längs der Erdoberfläche, wie dies Fig. 52 zeigt, vorwärts. Das sich so bewegende elektrische Feld ist von einem magnetischen Felde,

Fig. 50.

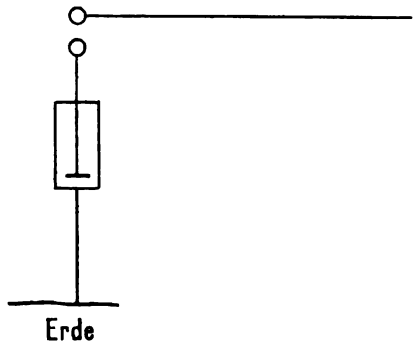
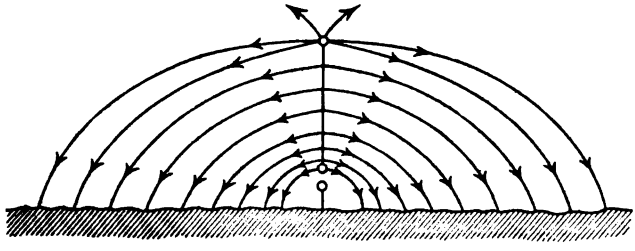


Fig. 51.

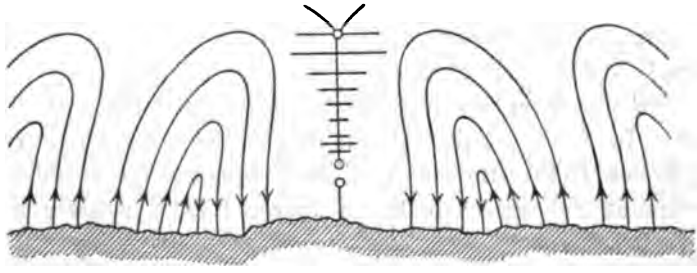


welches die Form von konzentrischen Kreisen hat, begleitet. Diese Kreise haben infolge ihres grossen Umfanges nur eine geringe Dichte, gerade so wie das magnetische Feld um einen Leiter von sehr grossem Querschnitte nur eine geringe Dichte hat. Da nun die Energieabsorption der Erde nach Poyntings Theorie proportional der Dichte des magnetischen Feldes und dem Widerstande der Erde

Digitized by Google

ist, so folgt, dass diese Absorption nur sehr klein sein kann und sich noch mehr verringern wird, wenn sich die Leitungsfähigkeit der Erde vergrössert. Dies ist auch ausser allem Zweifel die Ursache, dass bei Vermittelung von Nachrichten über See bessere Ergebnisse erzielt werden, als über Land. Bei dieser Form der Wellen findet auch keine Reflektion derselben von der Erde in den freien Raum statt, woraus sich die Folgerung zieht, dass Effekte sich über bedeutende Entfernungen erzielen lassen müssen. Thatsächlich vermindert sich auch die Intensität der Wellen nicht viel mehr als in dem einfach umgekehrten Verhältnis wie die Entfernung von der Erregerquelle. Dieses Resultat kann aber nur durch die Erhöhung der Dimension der Wellen, welche nach vorhergehendem durch Verlängerung des vertikalen Drahtes hervorgerufen wird, erreicht werden, und ergibt sich als Konsequenz, dass die zu überbrückenden Entfernungen im quadratischen Verhältnisse zur

Fig. 52.



Höhe des vertikalen Drahtes stehen. Die Erdverbindung ist jedoch für diese Anordnung von Wesenheit, weil ohne dieselbe Strahlung im Raume und Reflektion von der Erde in den Raum die Folge sein würde und sich die Wirkungen hierdurch bedeutend abschwächen müssen.

Da die Oberflächenformation der Erde, weil sich die Wellen längs derselben gleitend vorwärts bewegen, die Wirkung nur in geringem Masse beeinflusst, lässt sich schliessen, dass die Uebertragung, wenn nur hinreichend kräftige Effekte erzeugt werden können, auf irgend eine Entfernung möglich sein muss, soferne nicht Interferenzwirkungen, welche ja entstehen können, ein Hindernis bilden.

Nach Marconis Ansicht haben die Wellen in der Nachbarschaft ungefähr die vierfache Länge des vertikalen Drahtes und bestimmte derselbe, auf dieser Annahme fussend, für seine Versuche zwischen South Foreland und Boulogne sur Mer die Höhe der vertikalen Stange mit ca. 35 m und die Anzahl der Schwingungen mit ungefähr 1,6 Millionen pro Sekunde.

Digitized by Google

Nach dem Vorhergehenden könnte man auch annehmen, dass die Entfernungen, über welche man telegraphieren kann, durch fortgesetzte Erhöhung der vertikalen Stangen oder Drähte sehr weit hinausgerückt werden können. Wie jedoch die von Rotch und Greenleaf W. Pickard zwischen dem Blue Hill Observatory und dem Mount Chikatawbut durchgeführten Versuche zeigten, bei welchen zur Erreichung einer bedeutenden Höhe Drachen steigen gelassen wurden, ist diese Höhe gleichfalls eine begrenzte, indem die Einwirkungen der atmosphärischen Elektrizität jede telegraphische Uebertragung unmöglich machten. Nach den aus diesen Versuchen gezogenen Schlüssen ist die grösste Höhe, bis zu welcher man vom Erdboden aufsteigen darf, ohne Störungen durch die Einflüsse der atmosphärischen Elektrizität befürchten zu müssen, zwischen 130 bis 170 m gelegen.

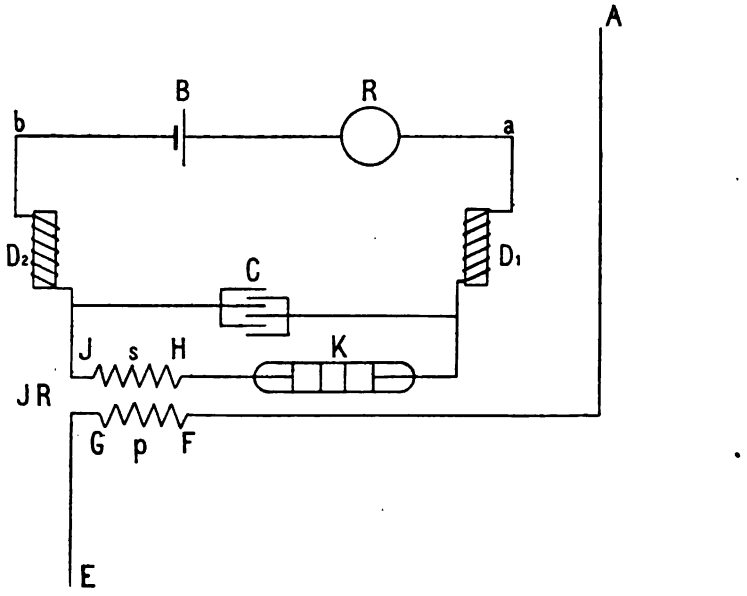
Neue Anordnungen Marconis für das Telegraphieren ohne Draht. In jüngster Zeit wurden Marconi eine Reihe von Neuerungen für die drahtlose Telegraphie patentiert. Zwei dieser Patente beziehen sich auf den Schutz der empfindlichen Empfangsinstrumente. Nach dem einen derselben wird der Empfänger in ein Gehäuse aus starkem Metalle, welches mit einer kleinen Oeffnung versehen ist, eingeschlossen und soll dieser Metallschirm den Empfänger gegen die störenden Einflüsse schützen, welche bei naher Aufstellung neben dem Funkengeber oder Sender eintreten können. Da Geber und Empfänger einer Station nahe aneinander aufgestellt sind, kann der vertikale Leiter und die Verbindung mit der Erde für beide Apparate gemeinsam verwendet werden, zu welchem Zwecke ein Umschalter dient, welcher je nach Bedarf den einen oder anderen Apparat mit diesen beiden verbindet. In diesem Falle muss das Gehäuse zwei Oeffnungen zur Zuleitung der Drähte vom Umschalter zum Empfänger haben, welche, wenn der Empfänger von der Funkenstrecke 40 cm weit entfernt ist, nicht verschlossen zu werden brauchen. Um jedoch dieses Schliessen zu ermöglichen, werden mit dem Umschaltehebel zwei Klappen derartig beweglich verbunden, dass sie beim Einschalten des Senders diese Oeffnungen im Schutzgehäuse des Empfängers verdecken.

Das zweite Patent bezieht sich gleichfalls auf den Schutz des Empfängers durch Einschliessen desselben in ein Eisengehäuse. Sollen nun die ankommenden Signale durch einen besonderen Apparat aufgezeichnet werden, so müssen Drähte vom Empfänger durch dieses Gehäuse geleitet werden. Um nun die Zuleitung störender Wellen durch diese Drähte zum empfindlichen Kohärer zu verhindern, wird die eine Verbindung der von aussen zulaufenden Drähte durch das

Digitized by Google

Metall des Gehäuses selbst hergestellt. Die zweite Verbindung besteht aus einer Rolle aus isoliertem Drahte, der mit Stanniol oder einem anderen metallischen Leiter umgeben ist. Das eine Ende dieser Rolle führt durch das Gehäuse hindurch zum Empfänger. Es soll vorteilhaft sein, diese Rolle durch einen kleinen Metallkasten gegen störende Einflüsse zu schützen. Diese Rolle soll aus 18 m eines 0,34 mm starken, mit Guttapercha isolierten Drahtes in 120 Windungen hergestellt werden. Als passende Stärke des Schutzgehäuses aus Eisen werden 0,13 cm angegeben.

Fig. 53.



Marconi nimmt ferner an, dass die Wirkung elektrischer Schwingungen auf einem unvollkommenen Kontakt (Kohärer) mehr von der E.M.K. dieser Schwingungen als von der Anzahl derselben in einem gegebenen Zeitraume abhängt. Er sucht demnach die E.M.K. derselben auf Kosten ihrer Menge zu erhöhen und dies durch die in Fig. 53 gegebene Anordnung unter Anwendung eines Transformators oder Translators zu erreichen. Das Empfangsinstrument oder der Kohärer K ist hiernach von der vertikalen Leitung und der Erde vollständig isoliert. Es bezeichnet hier A die vertikale Leitung, E die Erde und G p F die primäre Wickelung des Translators. Der Kohärer K steht einerseits mit der Sekundärspule J s H des Translators, andererseits mit der zu dem Empfangsapparate R führenden Leitung in Verbindung.

Digitized by Google

Das zweite Ende der Sekundärspule führt zur Batterie B und von da ab gleichfalls zum Empfangsapparate R, so dass der Stromkreis der Batterie B über den unvollkommenen Kontakt des Kohärers geschlossen ist. D_1 D_2 sind Dämpfungspulen, die verhindern sollen, dass die in der Sekundärspule des Translators entstehenden Schwingungen bei a und b in den Stromkreis übertreten und so die Wirkung der Oscillationen auf den Empfänger K beeinträchtigen. Zwischen den beiden, nach a und b führenden Leitungen, jedoch noch vor den beiden Dämpfungsspulen D_1 D_2 ist ein Kondensator C eingeschaltet, dem die Aufgabe zufällt, die E.M.K. der Schwingungen zu vergrössern.

Fig. 54.

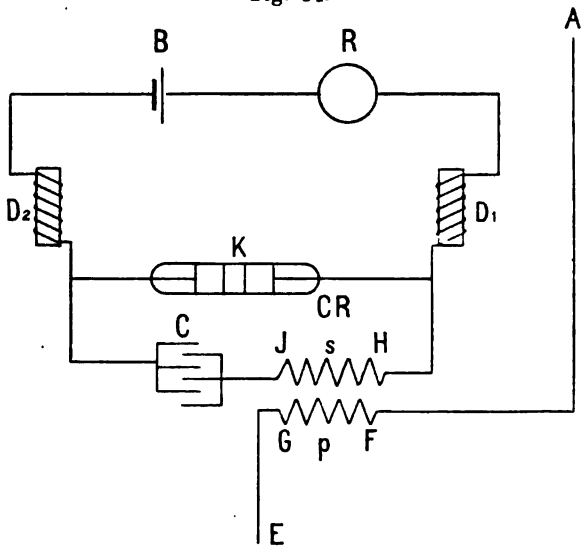


Fig. 54 stellt eine ähnliche Anordnung dar, welche sich von der vorhergehenden nur dadurch unterscheidet, dass hier der Kohärer im Nebenschluss und der Kondensator in den Hauptstromkreis eingeschaltet ist. Diese so geänderte Anordnung soll nicht ganz so gute Ergebnisse wie die in Fig. 53 liefern.

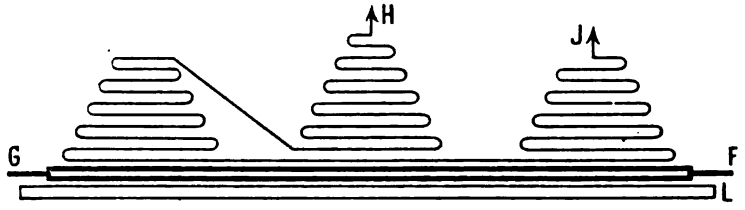
Durch Anwendung dieser Anordnungen soll die Strecke, über die unter sonst gleichen Verhältnissen noch Signale übermittelt werden können, sich bedeutend verlängern.

Wie aus dieser Anordnung auch ersehen werden kann, wird hier ähnlich wie bei Lodge (Fig. 44) aus der Uebertragung der Wellen auf eine Sekundärspule Nutzen gezogen.

Digitized by Google

Eine wichtige Rolle spielt bei dieser sekundären Uebertragung jedoch die Konstruktion des Transformators, und soll sich, wenn die Wickelung aus dem für gewöhnliche Induktionsrollen verwendeten Drahte hergestellt wird, die Wirksamkeit des Apparates, statt zu erhöhen, herabmindern. Der Transformator ist nur dann brauchbar, wenn er um einen Kern von passendem Durchmesser gewickelt und die Zahl der Windungen jeder Lage vorher genau bestimmt wird. Marconi hat im Verein mit Kapitän Kennedy eine grosse Anzahl solcher

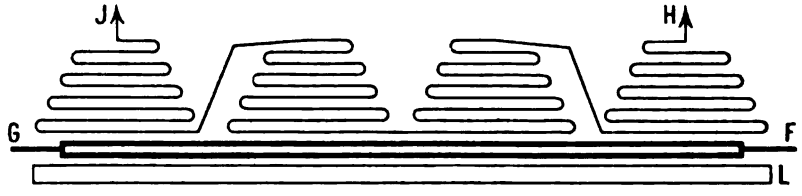
Fig. 55.



Rollen untersucht, ohne gute Resultate zu erzielen. Aehnliche Erfahrungen wurden auch seitens der Post Office bei ihren Versuchen mit drahtloser Telegraphie gemacht.

Da jedoch der Hauptsache nach die Art und Weise der Wickelung der Sekundärspule von Einfluss ist, wurden eine Reihe solcher Wickelungen, wie solche mehr oder minder günstige Ergebnisse geliefert haben, unter Patent gestellt.

Fig. 56.

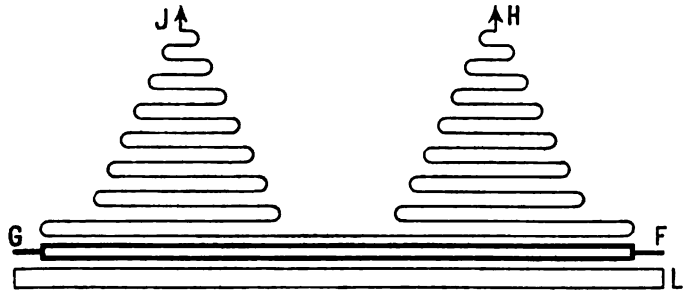


Eine Serie von Abbildungen (Fig. 55 bis 58) führt die Bauart verschiedener derartiger Transformatoren schematisch vor. In diesen Figuren ist die primäre Wickelung durch starke, die sekundäre Wickelung durch schwache Linien unterschieden, wiewohl in der Regel die beiden Drähte den gleichen Durchmesser haben. Diese Wickelungen sind hier nicht im Schnitte, sondern als fortlaufende Linien gezeichnet, um einen besseren Ueberblick über die Bauart derselben zu gewinnen. Jede horizontale Linie derselben stellt eine Windungslage dar, die

Digitized by Google

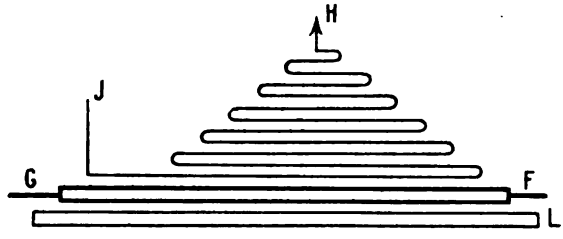
Länge dieser Linien gibt einen Anhaltspunkt darüber, wie sich die Windungszahlen der einzelnen Windungslagen zu einander verhalten. Wie hieraus ersehen wird, verringert sich die Zahl der Windungen jeder Windungslage um so mehr, je weiter sich selbe von dem aus einer Glasröhre von 0,935 cm Durchmesser gebildeten Kerne L entfernt. Die Buchstaben J, H bezw. G, F korrespondieren mit den Be-

Fig. 57.



zeichnungen in Fig. 53 und 54 und stellen jene Enden der Primär- und Sekundärspule dar, welche mit den Apparaten zur Verbindung gelangen. Von diesen Transformatoren hat sich der in Fig. 55 dargestellte Transformator bei den durchgeführten vergleichenden Versuchen am besten bewährt, und seien deshalb auch die weiteren Dimensionen desselben hier vorgeführt. Die beiden Wickelungen sind aus

Fig. 58.



gleich starkem Drahte von 0,01 Durchmesser hergestellt und besteht die primäre Wickelung aus zwei parallel geschalteten Lagen von je 160 Windungen. Die aus drei Teilen hergestellte sekundäre Wickelung ist in jedem ihrer Teile in 10 bezw. 12 Lagen aufgewickelt, von welchen der erste und dritte Teil gleich sind und die einzelnen Lagen derselben abgestuft 45, 40, 35, 30, 25, 20, 15, 12 und 5 Windungen, die Lagen des mittleren Teiles hingegen in den einzelnen

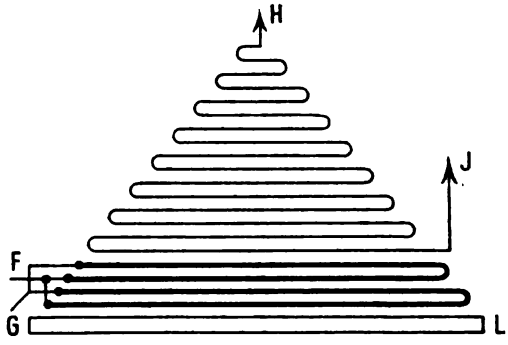
Digitized by Google

Lagen 150, 40, 39, 37, 35, 33, 29, 25, 21, 15, 10 und 5 Windungen enthalten.

Eine theoretische Begründung für diese Art der Anordnung der Windungen der Primär- und Sekundärspulen der Transformatoren konnte bisher nicht gegeben werden.

Schäfers System der drahtlosen Telegraphie. Die Anordnungen Schäfers stimmen mit den Anordnungen Marconis im wesentlichen überein, nur mit dem Unterschiede, dass er statt des von Marconi verwendeten Branly-Kohärers eine mit einem mikroskopisch kleinen Schlitze versehene Metallplatte als Empfänger verwendet. Diese Platte, welche sich noch viel empfindlicher erweisen soll als der vorhergehend benannte Apparat, basiert auf einer Erfindung von Neugschwender, welcher einen wirksamen „Dampf-

Fig. 59.



fritter" konstruiert hat. Im Gegensatze zu dem Kohärer bilden bei dem Empfangsinstrumente von Neugschwender Dampfbläschen für den elektrischen Strom des Sekundärkreises eine gut leitende Brücke, welche aber unter dem Einflusse elektrischer Wellen zerstört wird. Den Einfluss solcher Wellen auf derartige Bläschen hat Lodge in der Weise nachgewiesen, dass er zwei Seifenbläschen, welche sich knapp berührten, der Einwirkung elektrischer Wellen unterwarf. Sobald diese Bläschen von elektrischen Wellen getroffen wurden, vereinigten sich selbe zu einer grossen Blase. Der unter dem Namen Schäfersche Platte bekannte Empfänger besteht aus einem Glasspiegel mit Stanniolbelag, welch letzterer durch einen haarfeinen Schnitt in zwei isolierte Teile getrennt wird. Ist der Spalt zwischen diesen beiden Teilen des Stanniolbelages trocken, so ist auch der Strom der Sekundärbatterie durch den Spalt vollständig unterbrochen. Sobald jedoch dieser Spalt

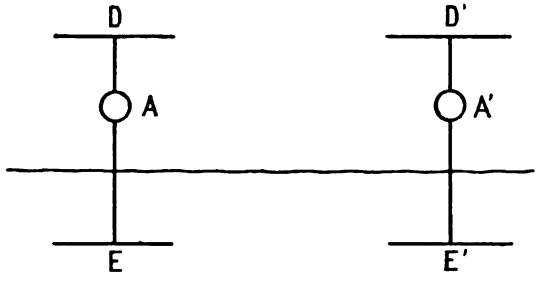
Digitized by Google

angehaucht wird, bilden die sich anlegenden Wasserbläschen eine leitende Brücke, die aber unter dem Einflusse der elektrischen Wellen dadurch zusammenbricht, dass sich grössere Bläschen bilden, die zu weit auseinander liegen, um sich gegenseitig zu berühren.

Für den praktischen Gebrauch bringt man, statt den Spalt anzuhauchen, in dessen Nähe ein feuchtes Tuch oder ein kleines Gefäss mit Wasser, dann kehrt sofort nach Aufhören der elektrischen Wellen der leitende Zustand des Spaltes zurück. Die Empfindlichkeit dieses Aufnahmeinstrumentes soll noch viel grösser sein als die des Branly-schen Kohärers, und ist selbes auch viel einfacher, da es zur Rückführung in den normalen Zustand keiner äusseren Beeinflussung bedarf.

Die Versuche mit diesem Empfänger erwiesen, dass dessen Empfindlichkeit von der verwendeten Glassorte abhängig sei und dass es zweckmässig ist, denselben durch eine luftdichte Hülle gegen atmo-

Fig. 60.



sphärische Einwirkungen zu schützen. Das Ergebnis dieser Versuche war ein durchaus günstiges und konnten bei denselben die grössten Entfernungen, über welche Nachrichten zu vermitteln waren, erzielt werden. Diese Entfernungen wurden jedoch von Marconi bald überholt, was jedoch nur den an den Sende- und Empfangsvorrichtungen mittlerweile durchgeführten Verbesserungen und nicht der Erhöhung der Empfindlichkeit des Kohärers zuzuschreiben ist.

Teslas Anschauungen über die Signalisierung durch den Raum. Nicola Tesla, welcher sich mit der Frage der Signalisierung durch den Raum ohne Vermittelung eines Leiters schon lange vor Marconi beschäftigte, die Lösung derselben aber mittels der nach ihm benannten Tesla-Ströme zu finden suchte, geht von der Anschauung aus, dass eine Stromquelle für Ströme hoher Frequenz A (Fig. 60), welche mit dem einen Ende mit der Erde, mit dem anderen aber mit einem Körper von grosser Oberfläche verbunden ist, indu-

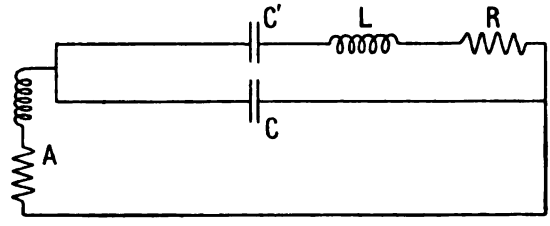
Digitized by Google

zierend auf den entfernten, in ähnlicher Weise angeordneten Empfänger einwirke. Befindet sich nun in dem Empfänger eine geeignet adjustierte Selbstinduktion und Kapazität, so wird derselbe innerhalb einer gewissen Entfernung durch Resonanz in Wirksamkeit gesetzt werden können.

Diese Methode zur Signalisierung bildet, da hier ein Alternator mit ca. 20000 Wechseln in der Sekunde zur Anwendung gelangt, ein Mittelding zwischen der elektrostatischen Induktionsmethode von Edison und der Wellenmethoden von Marconi und Lodge, bei welch letzteren Frequenzen bis zu 10 Millionen pro Sekunde zur Anwendung gelangen.

Die Zeichnung in Fig. 61 zeigt schematisch die Anordnung der Konstanten des Stromkreises. Der Alternator A hat eine gegebene Selbstinduktion und einen gegebenen Widerstand. C^1 bezeichnet den Kondensator der Empfangsstation, welcher in Reihe mit einem passen-

Fig. 61.



den Relais von dem Widerstande R und der Selbstinduktion L verbunden ist. C stellt den von der sendenden Platte und der Erde gebildeten Kondensator dar. Die Erde ist hierbei so dargestellt, als wenn selbe den Sende- und Empfangsstromkreis verbinden würde.

Die Einwirkung des Primärstromkreises auf den sekundären Stromkreis kann nun rechnerisch festgestellt werden, wenn der Wert der Konstanten bekannt ist. Die Feststellung der letzteren ist namentlich in Bezug auf die Kapazität der Kondensatoren mit Schwierigkeiten verbunden, weil die Nähe der Erde berücksichtigt werden muss. Die Formel zur Berechnung der Kapazität eines Kondensators mit zwei parallelen Platten $S = \frac{A}{4\pi d}$ nimmt an, dass das Feld zwischen denselben ein gleichmässiges sei. Dies trifft aber nur dann zu, wenn die Entfernung der Platten im Vergleiche zur Entfernung von fremden induzierenden Körpern sehr klein ist. Im vorliegenden Falle hat man aber gerade das Gegenteil hiervon, da die Entfernung zwischen Platte

Digitized by Google

und Erde viel geringer ist, als zwischen Platte und Platte, sohin der Erdkondensator eine viel grössere Kapazität haben muss als der Plattenkondensator. Die Berechnung eines theoretischen Effektes würde hier nur irreführen und muss an Stelle derselben die Experimentaluntersuchung treten. Da nun mit Rücksicht auf die Entfernung der in den Empfangsstromkreis übergehende Strom sehr klein ist und auch die Kapazität des Kondensators C^1 eine sehr geringe ist, muss entsprechend der Formel $T = 2\pi\sqrt{C.L}$ auch die Selbstinduktion des sekundären Stromkreises sehr klein gehalten werden, um Resonanz zu erhalten. Der Wert der Selbstinduktion kann, weil derselbe sehr klein sein muss, ebenfalls nicht rechnerisch ermittelt werden, und ist daher auf empirischem Wege jene Länge des Drahtes festzustellen, welche nötig ist, um die Kapazität zu neutralisieren.

Diese Methode der Uebertragung will Tesla auch zur elektrischen Kraftübertragung verwerten, und hat derselbe im Jahre 1898 ein Patent entnommen, nach welchem die Richtung eines Schiffes von einem bestimmten Punkte aus dirigiert werden soll.

Wiewohl es sich hierbei nicht um eine Signalisierung, sondern um eine direkte Kraftübertragung ohne Vermittelung eines Leitungsdrahtes handelt, dürfte der Analogie halber eine kurze Beschreibung der Einrichtung am Platze sein.

Es gelangen hier Transformatoren von grosser transformierender Wirkung zur Anwendung, und zwar wird in der Gebestation Strom niederer Spannung in hochgespannten Strom und umgekehrt in der Empfangsstation hochgespannter Strom in Strom niederer Spannung umgewandelt. Sowohl in der Empfangs- als in der Gebestation wird die Sekundärspule der Transformatoren mit dem einen Ende mit der Erde, mit dem anderen Ende mit einer erhöhten kondensierenden Oberfläche verbunden.

Da die dirigierende Kraft nicht ausreicht, um das Steuerruder direkt in Wirkung zu setzen, gelangen nebst einem dirigierenden Kohärerstromkreise zwei lokale Stromkreise mit Akkumulatoren als Kraftquelle zur Verwendung, welche den Steuer- und Bewegungsmechanismus durch zwischengelegte Elektromotoren bei Schluss der Kette in Bewegung setzen. In dem Kohärerstromkreis befindet sich ein Relais und ein Umschalter, welcher sich bei jeder Anregung des Relais umstellt und so abwechselnd den einen und den anderen Lokalstromkreis einschaltet und hierdurch den zugehörigen Motor in Antrieb versetzt. Fährt nun beispielsweise das Boot oder Schiff nach rechts und käme ausser Kurs, so wird der Kohärer durch Entsendung von

Digitized by Google

Oscillationen angeregt, das Relais bethätigt und der Umschalter umgestellt, hierdurch der eine Lokalstromkreis unterbrochen, der andere geschlossen und der Motor dieses Stromkreises stellt nun das Steuer so, dass das Schiff die Richtung „links" einschlagen muss. Ist nun das Schiff weit genug links gefahren, so wird der Kohärer neuerdings angeregt und in analoger Weise das Schiff wieder nach rechts dirigiert. Das Schiff verfolgt sohin seinen Weg in einer Reihe von Zick-Zack-Linien. Durch von Zeit zu Zeit vom Schiffe aus aufblitzende Signallichter ist es dem Dirigenten auch zur Nacht gut ermöglicht, das Schiff im richtigen Kurse zu steuern.

Albert Nodons Vorschläge zur Telegraphie ohne Draht. Nodon spricht der Zicklerschen lichtelektrischen Telegraphie im vornhinein jede praktische Bedeutung ab, weil die violetten und ultravioletten Strahlen, welche die elektrische Leitungsfähigkeit der Materien, welche sie durchstrahlen, beeinflussen, infolge der Kürze ihrer Wellenlänge vom Staube, von Wasserdämpfen oder von den Gasen der atmosphärischen Luft absorbiert werden. Abgesehen hiervon, dass hierdurch die Entfernung für die Vermittelung von Nachrichten ohne Verbindungsglied selbst bei reiner Atmosphäre sehr begrenzt ist, entbehrt sie auch der nötigen Sicherheit, weil beispielsweise, wie experimentell nachgewiesen wurde, durch Einfallen von Nebel die einzig wirksamen ultravioletten Strahlen gänzlich absorbiert werden können.

Die Absorption von Aetherwellen irgend welcher Natur durch die Gase und den Dampf der Atmosphäre ist um so grösser, je geringer deren Wellenlänge und je grösser deren vibratorische Geschwindigkeit ist. Dementsprechend werden die sehr kurzen Wellen der X-Strahlen von sehr kleinen Luftschichten absorbiert, wohingegen die sehr langen Hertzschen Wellen von relativ sehr geringer vibratorischer Geschwindigkeit mit grosser Leichtigkeit die Luft, den Wasserdampf, die atmosphärischen Niederschläge und die Mehrzahl der flüssigen und festen Körper durchdringen. Durch diese Eigenschaften eignen sich auch die Hertzschen Wellen so vorzüglich zur telegraphischen Uebertragung ohne Draht.

Es frägt sich nun, ob nicht andere Arten von Strahlen oder Wellen sich in gleicher Weise für die Fernübertragung verwerten lassen.

Betrachtet man nun die dunklen Wärmewellen, so zeigen selbe, wiewohl sie viel kürzer sind als die Hertzschen Wellen, gleichfalls die Eigenschaft, eine mit Wasserdämpfen und Staub durchsetzte Atmo-

Digitized by Google

sphäre zu durchdringen, ohne einer wesentlichen Absorption durch selbe zu unterliegen. Die dunklen Wärmestrahlen erscheinen daher im vornhinein um so mehr für die Telegraphie ohne Draht anwendbar, als man ja im Besitze mächtiger Wärmequellen auch über die nötigen Energiemengen verfügt.

Die zur Durchführung dieser Art von Transmission erforderlichen Einrichtungen lassen sich leicht erfinden. So kann der Empfänger aus einer empfindlichen Thermosäule oder einem Bolometer, etwa nach dem Langleyschen Prinzipe aufgebaut, bestehen. Die Aenderung der Temperaturen in dieser Thermosäule oder dem Bolometer lassen sich nun entsprechend ausnützen, um die erhaltenen Zeichen auf ein registrierendes Empfangsinstrument zu übertragen. Diese beiden Apparate, welche sehr empfindlich gestaltet werden können, spielen in diesem Falle die Rolle des Relais.

Der Geber als solcher setzt sich zusammen aus einer möglichst intensiven Quelle zur Erzeugung dunkler Wärmestrahlen, wie beispielsweise einer Kokspfanne, einem im Hintergrunde derselben postierten metallischen Parabolspiegel, um die Wärmestrahlen parallel zu entsenden, und einem Unterbrechungsschirme vor der Wärmequelle zusammen, welch letzterer, indem er den Wärmestrahlen abwechselnd den Durchgang gestattet oder verbietet, die Stelle des Telegraphentasters oder Zeichengebers vertritt.

Da bisher derartige Versuche mit den Wärmestrahlen nicht durchgeführt wurden, empfiehlt derselbe dringend die Anbahnung von solchen, da hierdurch ein ausserordentlich einfaches Mittel von grosser Wichtigkeit für die Durchführung der Telegraphie ohne Draht gegeben sein würde.

Schlussbemerkungen. Skeptische Geister vermögen in der drahtlosen Telegraphie noch keine grosse Errungenschaft zu erblicken, indem erstens die Entfernungen, über welche gesprochen werden kann, dermalen noch eine zu geringe ist, die Uebertragungsgeschwindigkeit, etwa 12 Worte pro Minute, als zu klein angesehen wird und endlich die vollkommene Wahrung des Geheimnisses der Mitteilung kaum zu erreichen sein wird. Sanguiniker hingegen sehen der Zukunft hoffnungsfreudig entgegen und erwarten zum mindesten, dass es der drahtlosen Telegraphie gelingen wird, die Ueberseekabel zu verdrängen und so einen freieren, ungehinderten und billigen telegraphischen Verkehr über alle Länder des Erdballes zu schaffen. Wie überall, so auch

Digitized by Google

hier, wird der richtige Weg in der Mitte liegen. Die Entwickelung der drahtlosen Telegraphie liegt allerdings noch in der Kindheit, allein die Fortschritte, welche dieselbe namentlich in den letzten 3 Jahren zu verzeichnen hat, lassen, nachdem sich so viele hervorragende Geister mit dieser aktuellen Angelegenheit beschäftigen, eine den natürlichen Verhältnissen angepasste Lösung aller noch offen stehenden Fragen in Kürze erhoffen. Den Telegraphen mit fortlaufendem Drahte, wie solcher den ganzen Erdball umspannt, vermag die drahtlose Telegraphie wohl kaum zu ersetzen, sie ist aber bestimmt, denselben zu ergänzen und stehen ihr daher noch so viele Anwendungsgebiete offen, dass auch denjenigen, welche zu ihrer Verbesserung und Ausgestaltung beitragen, materielle Erfolge, einer der Hauptansporne zu intensiver Bethätigung, winken.

In erster Linie scheint die drahtlose Telegraphie dazu bestimmt, den Verkehr zwischen festen und beweglichen oder nur zwischen beweglichen Objekten, also überall dort, wo eine direkte Leitungsverbindung unmöglich oder nur mit grossen Schwierigkeiten herzustellen ist, zu vermitteln.

Dieses Gebiet erstreckt sich namentlich auf die Seeschiffahrt, woselbst die drahtlose Telegraphie namentlich zur Verhütung von Schiffszusammenstössen, zur Herbeirufung von Hilfe bei Unfällen unschätzbare Dienste zu leisten berufen ist. Ihre Verwendbarkeit für diesen Dienst ist unzweifelhaft nachgewiesen und sprechen sich die Berichte über die bei der italienischen, amerikanischen und englischen Kriegsmarine speziell mit dem System von Marconi durchgeführten Versuche so günstig aus, dass deren allgemeine Einführung nicht nur bei den Kriegs-, sondern auch bei den Handelsmarinen in kurzer Zeit zu erwarten steht.

Der Wert für die Herbeirufung von Hilfe hat sich bereits erwiesen. Am 28. April vorigen Jahres stiess ein Dampfer an das East Goodwin-Leuchtschiff an und beschädigte dasselbe so schwer, dass es dem Sinken nahe war. Nachdem dieses Schiff zu Versuchen für die drahtlose Telegraphie mit dem 18 km weit entfernten South Foreland-Leuchtturm mit den entsprechenden Sendeapparaten ausgerüstet war, konnte dieser Leuchtturm von dem Unfalle verständigt werden. Sofort wurde dies weiter nach Ramsgate mitgeteilt und in kurzer Zeit langte ein Schleppdampfer nebst einem Rettungsboote bei dem sinkenden Schiffe an und vermochte das sonst unvermeidlich verlorene Schiff noch zu retten.

Um die Fortschritte der drahtlosen Telegraphie nur in den letzten

Digitized by Google

2 Jahren einigermassen würdigen zu können, muss man sich vergegenwärtigen, dass man von den anfänglich erzielten Resultaten, über 2 km sprechen zu können, schon sehr befriedigt war. Bei den ersten Versuchen mit der Marconi-Telegraphie im Hafen zu Spezzia konnten schon Entfernungen bis zu 12 km überwunden werden, doch ergab sich noch eine gewisse Unzulänglichkeit in der Zeichenübertragung. Bei den in England neu aufgenommenen Versuchen wurden auf 18 km Entfernung ständig äusserst befriedigende Resultate erzielt. Diese Entfernungen wurden nach und nach erhöht, bis endlich die Verbindung zwischen England und Frankreich vom South Foreland-Leuchtturm nach Wimereux auf 51 km Entfernung aktiviert wurde und tadellos arbeitete. Kurze Zeit darauf gelang es Bela Schäfer bei den Versuchen im Golfe von Fiume unter erschwerenden Umständen, weil die telegraphierenden Schiffe durch mehrere Landzungen voneinander getrennt waren, Zeichen über 64 km zu übertragen. Gelegentlich der im verflossenen Jahre durchgeführten Seemanöver der englischen Schlachtflotte wurden Nachrichten bereits über 100 km vermittelt. Diese Entfernung wurde bei den amerikanischen Seemanövern mit 130 km überflügelt. Durch einen Zufall wurde erkannt, dass man noch nicht an der Grenze der Leistungsfähigkeit angelangt sei, indem die Station Chelmsford an der Linie London-Harwich eine von Wimereux stammende Depesche, also über 150 km Entfernung, aufzunehmen vermochte.

In neuester Zeit soll es Marconi auch gelungen sein, das Ablesen der Depeschen durch eine andere Station unmöglich zu machen und können beispielsweise die vom South Foreland-Leuchtturm nach dem East Goodwin-Leuchtschiffe entsendeten Nachrichten nicht von Wimereux und umgekehrt die von Wimereux nach dem Leuchtturme abgehenden Signale nicht von dem Leuchtschiffe aus abgenommen werden.

Dass sich die drahtlose Telegraphie auch für den Verkehr über Land als wertvoll erweist, wird durch die zwischen Chamounix und dem Vallet-Observatorium auf dem Gipfel des Mont Blanc errichtete Verbindung bestätigt. Bisher waren die Ergebnisse günstig, nur wirkte der Betrieb der elektrischen Beleuchtung in Chamounix störend auf die Apparate ein.

Nachdem nun K. Strecker nachgewiesen hat, dass die einlangenden Zeichen sich auch auf den Hughes-Apparat übertragen lassen, steht wohl die Möglichkeit in Aussicht, auch eine grössere Uebertragungsgeschwindigkeit zu erreichen.

Digitized by Google

Da die Uebertragung elektrischer Wellen durch die Luft und die Möglichkeit, dieselben in entsprechender Weise nutzbar zu machen, nunmehr endgültig nachgewiesen ist, sind auch die Wege für die weiter zu erreichenden Ziele gebahnt und leiten die bisherigen Erfahrungen dahin, dass dies durch Anwendung kräftigerer Wellenerreger und Abstimmung der heute schon hinreichend empfindlichen Empfänger anzustreben sein wird.

Digitized by Google

Elektrische Bleicherei.

Von

Dr. **P. Schoop**, London.

Mit 21 Abbildungen.

Seit einer Reihe von Jahren wird Chlorkalk in grossem Massstab auf elektrischem Wege hergestellt. Das durch elektrolytische Zersetzung von Kochsalz gewonnene Chlorgas wird, gerade wie dies mit dem bisher chemisch erzeugten Chlor geschah, über Aetzkalk geleitet und der so erhaltene Chlorkalk scheint auch vollkommen identisch mit dem auf rein chemischem Wege fabrizierten Produkt zu sein. Das Bleichen mit solchem, obschon mit Zuhilfenahme von Elektrizität erzeugten Chlorkalk kann daher keinen Anspruch auf die obenstehende Bezeichnung machen.

Die Technik der elektrischen Bleicherei steht vielmehr in einem gewissen Gegensatz zu der eben erwähnten Chlorkalkfabrikation, indem jene die Gewinnung von Bleichflüssigkeiten zum Ziele hat, welche unmittelbar mit den zu bleichenden Stoffen zusammengebracht werden können. Es handelt sich also um Lösungen mit ziemlich geringem Gehalt an bleichendem Chlor, selten mehr als 1 %, meistens nur ½ %, einer Stärke, welche eben für das zu bleichende Gewebe oder Material zuträglich ist. Dementsprechend dienen als Ausgangsprodukt verdünnte Lösungen von Kochsalz oder anderen Chloriden (wie Chlorcalcium, Chlormagnesium) und es werden grosse Flüssigkeitsmengen erhalten, welche kaum transportfähig sind. Die Herstellung von Bleichflüssigkeiten hat also immer am Ort des Gebrauches, im Fabrikationsbetrieb selbst, zu geschehen. Dieser Umstand steht in geradem Gegensatz zu den bei der elektrischen Chlorkalkfabrikation zutreffenden Verhältnissen. Hier wird ein Produkt erzeugt, das auf weite Entfernungen hin versandt werden kann. In Verbindung

Digitized by Google

damit hängt die Ausbeutung grosser Wasserkräfte oder, anders ausgedrückt, die Verwendung billigster Kraft für die Elektrolyse. Aber noch weitere Vorteile bietet diese Art der Kochsalzelektrolyse: es können heisse konzentrierte Lösungen oder geschmolzenes Kochsalz verwendet werden, wodurch die Widerstandsarbeit des elektrischen Stroms auf ein Minimum gebracht und neben dem Chlorkalk ein noch wertvolleres Produkt, kaustisches Natron, gewonnen wird. Da ist es wohl begreiflich, dass bei der vergleichenden Kostenberechnung mit Bezug auf die Erstellungskosten z. B. eines Kilogrammes bleichenden Chlors die Ueberlegenheit der Chlorkalkfabrikation hervorgeht.

Anders aber gestaltet sich der Vergleich, wenn als Massstab der Bleicheffekt gewählt, also ermittelt wird, wie hoch sich die Ausgaben in beiden Fällen belaufen, um z. B. 1000 kg Baumwolle vollkommen zu bleichen. Eigentlich ist diese Grundlage des Vergleichs auch die natürlichste. Wenn nun die Gewichtseinheit bleichendes Chlor in der Bleichflüssigkeit genau dieselbe Bleichwirkung ausübte, wie im Chlorkalk bezw. der aus demselben bereiteten Auflösung, so müsste abermals der Chlorkalk siegreich aus der Konkurrenz hervorgehen. Aber das Gegenteil ist der Fall und die Ursache dieser überraschenden Thatsache liegt darin, dass der Gewichtseinheit wirksamen („aktiven") Chlors in der elektrolytisch erzeugten Bleichlösung ein weit grösserer Effekt zukommt, als derselben Gewichtsmenge aktiven Chlors im Chlorkalk[1]). Je nach der Natur des zu bleichenden Stoffes genügt die Hälfte bis ein Drittel des bei der Chlorkalkbleiche nötigen Gewichts von wirksamem Chlor, um denselben Bleicheffekt mit elektrolytischer Bleichflüssigkeit herbeizuführen. Ein Beispiel mag dies erläutern. Um 1000 kg loser Baumwolle (Maco) zu bleichen, wurden 3000 l Lösung (erhalten durch Auflösen von Chlorkalk in kaltem Wasser und Ausfällen des Kalks mit Sodalösung) mit 4 per Mille wirksamem Chlor gebraucht. Dasselbe Quantum derselben Baumwolle wurde ebenso gebleicht mit 3000 l elektrolytischer Flüssigkeit mit nur 2 per Mille Gehalt an wirksamem Chlor. Aehnliche Verhältnisse sind auch bei anderen Faserstoffen, z. B. Jute, Hanf, Flachs, Ramie vom Verfasser beobachtet worden. Es kann keinem Zweifel unterliegen, dass die Wirkung des sogenannten „aktiven" Chlors in den elektrolytisch erzeugten Bleichflüssigkeiten sich intensiver auf die Zerstörung der Farbstoffe und dafür viel weniger auf die Faser selbst erstreckt, als bei den aus Chlorkalk bereiteten Lösungen.

[1]) Diese Thatsache ist schon von C. F. Cross beobachtet worden.

Digitized by Google

Trotzdem dieser auffallende Unterschied bis jetzt noch nicht wissenschaftlich aufgeklärt ist, ist derselbe doch von ungemeiner Bedeutung für die Bleichtechnik und geeignet, eine Umwälzung in dieser zu bewirken, wie bei Papierfabriken, Baumwollbleichereien, Färbereien, Hanf- und Flachsspinnereien und anderen Gewerben. Dass bei der Chlorkalkbleiche (und auch bei der Rasenbleiche) in manchen Fällen volle Weisse nur mit Einbusse an Faserfestigkeit erreicht werden kann, ist bekannt. Es ist daher als ein Fortschritt zu begrüssen, dass mit elektrolytischer Bleichflüssigkeit viele Bleicheffekte erzielt werden können, die bisher überhaupt nicht erreichbar waren, und dass im allgemeinen die Gefahr des „Verbrennens" der Ware fast ausgeschlossen ist. Der ganze Bleichprozess ist reinlicher geworden durch den Wegfall der Chlorkalkrückstände, geht schneller und leichter vor sich, stellt sich ökonomisch billiger als die Chlorkalkbleiche und liefert ein besseres Produkt als jene.

Die schöne Zukunft, welche der elektrischen Bleicherei bevorsteht und der Umstand, dass nach langer Entwickelungszeit ein gewisser Abschluss in dieser eingetreten zu sein scheint, mögen die Abfassung dieser Monographie rechtfertigen.

Es mögen zuerst die Eigenschaften der elektrolytischen Bleichlösungen kurz angeführt, darauf in chronologischer Reihenfolge diejenigen Apparate besprochen werden, welche Eingang in die Praxis gefunden haben, und zum Schluss einige, mehr theoretisches Interesse beanspruchende Vorschläge und Gedanken Platz finden. Es kann nicht im Rahmen dieses Vortrags liegen, eine erschöpfende Behandlung dieses Gegenstandes zu liefern und die bereits zahlreichen Patente darüber oder die einschlägigen theoretischen Arbeiten kritisch zu beleuchten. Vielmehr sollen diese Ausführungen bezwecken, dem Leser ein ungefähres Bild des jetzigen Standes der elektrischen Bleicherei zu geben.

Es scheint, dass C. Hermite als eigentlicher Begründer der elektrischen Bleichtechnik anzusehen ist, welcher vor bald 20 Jahren seine in grossem Massstabe gehaltenen Elektrolyseure in Papier- und Flachsfabriken einführte. Hermite elektrolysierte Meerwasser und nachher verdünnte Lösungen von Chlormagnesium und erhielt ganz vorzügliche Bleichflüssigkeiten, welche den jetzigen, ausschliesslich aus Kochsalzlösungen bereiteten in keiner Weise nachstehen. Roscoë und Lund elektrolysierten Meerwasser mittels des gleich zu beschreibenden Apparates von Hermite und fanden, dass eine Lösung mit 1‰igem Gehalt an wirksamem Chlor nach 24 Stunden 10%, mit 0,75‰igem Gehalt 34%, mit 0,5‰igem Gehalt 90% des aktiven Chlors einge-

Digitized by Google

büsst hatte. Je grösser die Verdünnung der Bleichflüssigkeit ist, desto rascher zersetzt sich dieselbe; doch ist auch die Temperatur und namentlich der Grad von Alkalität der Lösung massgebend auf die Haltbarkeit solcher Lösungen, wobei niedrige Temperatur und alkalische Reaktion günstig wirken.

Aehnlich wie elektrolysiertes Meerwasser verhalten sich entsprechend verdünnte Chlormagnesiumlösungen. Etwas beständiger erscheinen die aus Kochsalzlösungen erhältlichen Bleichflüssigkeiten. Die durch Elektrolyse von 10%iger Salzlösung zwischen Platinelektroden erhaltene Flüssigkeit enthielt:

nach Tagen	El. Kochsalzlösung aufbewahrt		Chlorkalklösung aufbewahrt		
	im Licht	im Dunkeln	im Licht	im Dunkeln	
0	0,536%	0,536%	0,536%	0,536%	aktives Chlor
1	0,455	0,532	0,438	0,536	
2	0,409	0,520	0,351	0,535	
3	0,364	0,508	0,264	0,531	
4	0,322	0,483	0,216	0,530	
5	0,302	0,479	0,186	0,501	
6	0,293	0,475	0,158	0,499	
10	0,211	0,442	0,063	0,495	
15	0,160	0,418	0,037	0,382	
20	0,142	0,398	0,012	0,219	
25	0,138	0,386	0,011	0,166	

Diese elektrolysierte Bleichflüssigkeit zersetzt sich, wie bei Chlorkalklösungen wohl bekannt ist, rascher im Licht als im Dunkeln, ist aber eher beständiger als Chlorkalklösung von gleichem Gehalt an wirksamem Chlor. Interessant ist, dass die Intensität der Bleichwirkung einer solchen Lösung um so grösser ist, je leichter zersetzlich letztere ist. Bei gleichem Gehalte an bleichendem Chlor scheint im allgemeinen Chlormagnesiumlösung kräftiger als Chlorcalciumlösung und diese wieder stärker als Kochsalzlösung zu bleichen. Dies mag zum Teil in der verschiedenen Alkalität der Lösungen begründet sein. Allen gemeinsam ist aber der zunehmende Bleicheffekt, auf die Gewichtseinheit wirksamen Chlors bezogen, mit steigender Verdünnung. Je geringer das spezifische Gewicht der Bleichflüssigkeit ist, desto leichter findet das Eindringen derselben in das zu bleichende Material statt, was z. B. bei der Bleichung von Baumwollspulen (Cops, Bobines) noch besonders wichtig ist. Trotzdem die Elektrolyse verdünnter Salzlösungen einen verhältnismässig grossen Aufwand elektrischer Arbeit erfordert, infolge des höheren Widerstandes gegenüber gesättigten

Digitized by Google

Lösungen, wird daher die Verwendung jener begreiflich. Die Konzentration der zu elektrolysierenden Salzlösungen schwankt zwischen 3% und 10% Salzgehalt. Allerdings steigt die Diffusionsgeschwindigkeit der Bleichflüssigkeit auch mit der Temperatur, doch darf diese nicht viel über 20° C. betragen, um Bildung von Oxycellulose zu vermeiden.

Ueber das Verhalten der Bleichlösung, welche durch Elektrolyse von 8%iger Kochsalzlösung erhalten worden war und 0,34% aktives Chlor enthielt, gegenüber verschiedenen Farbstoffen macht Agloblin einige Angaben. Die mit den verschiedenen Farben bedruckten Kattunmuster waren zuerst mit Salzsäure gesäuert, dann mit Natronhydrat gebäucht und mit Wasser ausgewaschen und diese Vorbehandlung wiederholt worden, worauf dieselben in ein jedenfalls mehr als hinreichendes Volum Bleichlösung gebracht wurden. Am schnellsten werden Anilinfarbstoffe, wie Viktoriablau, Brillantgrün, Chryseolin, Anilinschwarz, auch Alizarin, entfärbt — nach 15 Minuten — während Cöruleïn und Türkischrot nach 40 Minuten, Blauholz mit Eisenbeize und Kreuzbeere mit Thonerdebeize erst nach 1—2 Stunden entfärbt waren. Indigo brauchte 18 Stunden und Katechu mit Bichromatbeize (Diamantschwarz) zeigte nach 1/2 Stunde noch keine Veränderung. Die Festigkeit der Faser wurde nicht entfernt so beeinträchtigt, wie dies eintritt, wenn derselbe Bleicheffekt mit Chlorkalk erzielt werden soll.

In dieser Hinsicht zeigen auch die der Faser inkorporierten natürlichen Farbstoffe ein ähnliches Verhalten. Maco-Baumwolle, welche mit 3‰iger elektrolytischer Bleichflüssigkeit innerhalb 2 Stunden tadellos gebleicht werden konnte, zeigte selbst nach tagelanger Einwirkung von Chlorkalklösung mit gleichem Chlorgehalt unvollständige Bleiche.

Die Entwickelung der elektrischen Bleicherei hängt auf das Innigste mit der Ausbildung der zur Herstellung der Bleichlösung dienlichen Apparate zusammen[1]). Hermites weit bekannt gewordener Elektrolyseur enthält eine eiserne, innen emaillierte Kufe, in welcher die Salzlösung an den Elektroden vorbeigeführt wird. Auf einer die Kufe durchdringenden, horizontalen Welle mit mechanischem Antrieb sitzen eine Anzahl kreisrunder, senkrecht und parallel zu einander stehender Zinkscheiben, welche die Kathode bilden, diejenige Elektrode, an welcher der Wasserstoff auftritt. Zwischen diesen Zinkscheiben gelagert befinden sich mit Platindrahtnetz bespannte Rahmen aus Hartgummi, welche miteinander in metallischer Verbindung stehen. Die

[1]) Siehe auch: Manuel d'Electrochimie, H. Becker, Paris 1898.

Digitized by Google

während des Stromdurchganges in Umdrehung versetzten Zinkplatten sorgen für gründliche Mischung der an den Elektroden abgeschiedenen Produkte.

Roscoë und Lund elektrolysierten mit diesem Apparat 750 l Meerwasser mit 250 Ampère Stromstärke und 6,1 Volt Klemmspannung und fanden:

Nach Minuten	Chlor per Liter	Total	Theorie	Nutzeffekt
15	0,085 g	63 g Chlor	82,7 g Chlor	77 %
30	0,168	126	165	76
45	0,246	184,5	248	74
75	0,400	300	413,5	72
90	0,470	353	496	71
105	0,534	400,5	579	68

Eine zweite, länger andauernde, sonst unter denselben Umständen ausgeführte Elektrolyse ergab:

Nach Stunden	Chlor per Liter	Total	Theorie	Nutzeffekt
1	0,253 g	189,8 g Chlor	331 g Chlor	58 %
2	0,446	335	662	50
2½	0,520	390	827	47
3½	0,637	478	1158	41
4½	0,754	566	1489	37
6	0,966	725	1986	36
7	1,136	852	2317	36

(Der Berechnung der theoretischen Zahlen ist die Ausscheidung von 1,323 g Chlor per Ampèrestunde zu Grunde gelegt.)

Es zeigt sich, dass der elektrochemische Nutzeffekt um so gegeringer ausfällt, je mehr sich die Lösung an wirksamem Chlor anreichert und je länger die Elektrolyse dauert. Wenn 5%ige Chlormagnesiumlösung elektrolysiert und daraus Bleichflüssigkeit mit 4 bis 5 per Mille Chlor erzeugt wird, schwankt der Nutzeffekt um 60%. Es ist leicht begreiflich, dass der Nutzeffekt unter anderem auch vom prozentualen Verhältnis der Zersetzung abhängig ist und höher sein muss, falls nur $^1/_{10}$ des vorhandenen Salzes elektrolytisch zerlegt worden ist, als wenn z. B. $^5/_{10}$ des Salzes elektrolysiert werden sollen. Denn wenn auch dem durch die Elektrolyse gebildeten Produkt, einer den Salzen der unterchlorigen Säure vielleicht ähnlichen Verbindung, eine weit geringere Leitfähigkeit zugemutet werden darf, als den übrigen vorhandenen Salzen, ist die Wiederzersetzung des bereits entstandenen Bleichkörpers doch nicht unmerklich.

Digitized by Google

Der geschilderte Apparat konnte sich keines dauernden Erfolges erfreuen, aus mancherlei Ursachen, welche im Laufe der Zeit allmählich erkannt worden sind.

Chlormagnesium wird durch den elektrischen Strom in seine Elemente gespalten, so, dass am Platin Chlor, am Zink Magnesium erscheint. Letzteres reagiert aber auf das vorhandene Wasser augenblicklich und als sichtbares Endprodukt erscheinen lediglich Wasserstoffgas und Magnesiumhydroxyd. Das Chlor andererseits setzt sich mit Wasser um, gelangt alsbald in Berührung mit dem unlöslichen Magnesiumhydroxyd, dieses in lösliches Hypochlorid überführend. Indessen geschieht dies nicht vollständig und ein Teil des Hydroxyds lagert sich als isolierende Schichte auf der Oberfläche der Zinkscheiben ab, welche sich durch die an die Zinkscheiben gelegten messerförmigen Schaber nicht entfernen lässt. — Zu Anfang der Elektrolyse, solange die Zinkscheiben noch metallisch glänzend sind, beträgt die Klemmspannung etwa $4\frac{1}{2}$ Volt; mit der Zeit erhöht sich diese und zwar ziemlich rasch, schon nach wenigen Stunden auf den doppelten Betrag und darüber, wodurch sich der Kraftbedarf auf praktisch unzulässige Höhe stellt. Es muss dann durch Abbürsten mit Salzsäure der störende Ueberzug beseitigt werden, was jedesmal eine Betriebsstörung mit sich führt und auch auf die Dauerhaftigkeit der Zinkscheiben von Nachteil ist. — Ein weiterer Uebelstand besteht in der raschen Abnützung der Platindrahtnetze. Im technischen Betriebe lässt es sich manchmal schwer vermeiden, dass das zur Herstellung der Salzlösung benützte Wasser ganz frei von mechanischen Beimengungen, wie Sand u. dergl. sei. Der durch die rotierenden Zinkscheiben an den Platinnetzen vorbeigeführte Sand veranlasst zu bald eine bei dem hohen Werte jenes Metalls doppelt empfindliche Gewichtsabnahme desselben. — Hermite setzte allerdings mit der Zeit seiner Chlormagnesiumlösung immer mehr Kochsalz zu, aber selbst mit reiner Kochsalzlösung funktioniert der Apparat nicht vollkommen, indem das nunmehr an den Zinkplatten auftretende Natronhydrat alsbald lösend auf diese einwirkt.

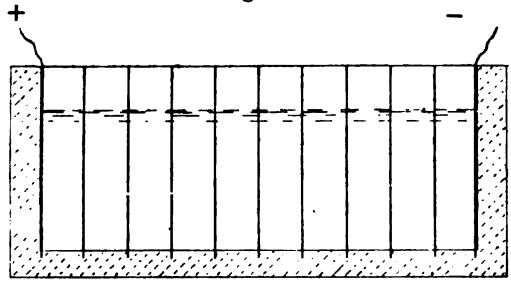
Heute, auf Grund der bahnbrechenden Arbeiten Hermites, fällt es nicht mehr schwer, die Ursache seiner vergeblichen Bemühungen zu erkennen. Kein anderes Metall, als nur Platin, vermag auf die Dauer der zerstörenden Wirkung des Bleichbades zu widerstehen. In dieser Hinsicht kann höchstens noch Graphitkohle in Betracht kommen. So zeigen denn die neueren Apparate ausnahmslos auch sogenannte doppelpolige Elektroden. Bei diesen kann der isolierende Ueberzug auf der

Digitized by Google

Kathode durch blosse Aenderung der Stromrichtung entfernt und so jederzeit ohne Betriebsstörung der Widerstand des Systems innerhalb zulässiger Grenzen gehalten werden.

O. Knöfler scheint zuerst doppelpolige Elektroden bei Bleichapparaten eingeführt zu haben, Platinfolien, welche auf der einen Seite als Kathode, auf der gegenüberliegenden Seite als Anode fungieren. Man denke sich einen Trog aus isolierendem Material, z. B. Hartgummi, und von rechteckigem Querschnitt durch eine Anzahl von Platinblechen, die vertikal und parallel zu einander stehen, in gleichartige Kammern eingeteilt, welche oben offen sind, aber flüssigkeitsdicht gegen Boden und Seitenwände des Troges abschliessen, wie Fig. 1 veranschaulicht. Die beiden Endbleche seien mit einer Stromquelle in Verbindung. Solange das System leer ist, kann kein Strom

Fig. 1.



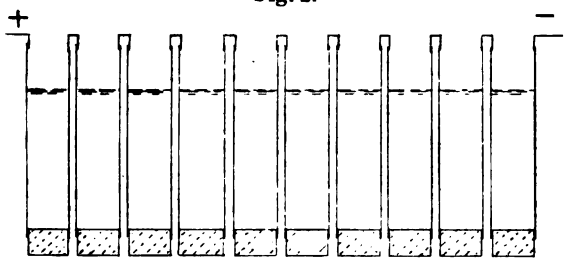
durch dasselbe fliessen, da die einzelnen Platinbleche in keiner leitenden Verbindung miteinander stehen. Sobald aber sämtliche Kammern mit Salzlösung angefüllt werden, zeigt die Gasentwickelung an den Blechen an, dass Elektrolyse eingetreten ist. An sämtlichen linksseitigen Flächen steigt Wasserstoffgas empor und bei genauerer Betrachtung der rechtsseitigen Flächen lässt sich das Auftreten von Chlor daran erkennen. — Man kann sich diese Anordnung in gleichviel einzeln stehende Zellen, wie Kammern vorhanden sind, aufgelöst denken, wobei alle Zellen hintereinander geschaltet sind, wie in Fig. 2 angedeutet ist. Da hier die Zellwände aus Platinblech bestehen, genügt es auch, die Elemente einfach aneinander zu stossen, wie in Fig. 3 der Fall, und es ist ersichtlich, dass für die so entstehenden Doppelwände auch einfache Wände denselben Dienst versehen, wodurch wieder die in Fig. 1 gezeichnete Anordnung entsteht [1]).

[1]) Siehe auch: Haber, Technische Elektrochemie, München 1898.

Digitized by Google

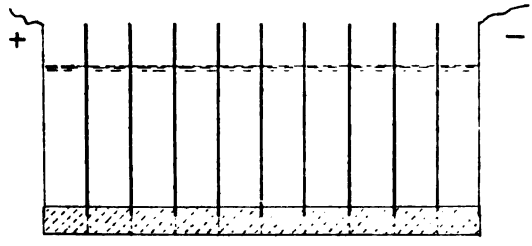
Knöflers Apparat ist wie eine Filterpresse aufgebaut und zeigt auch äusserlich dasselbe Aussehen. An Stelle der Filtertücher, welche bei jener zwischen den einzelnen Hartgummirahmen Platz finden, treten dünne Platinbleche. Jede dieser flachen und schmalen Kammern ist in der oberen Hälfte mit einer Zuflussöffnung für die Salzlösung und am Boden mit einem Ablasshahn für die elektrolysierte Flüssigkeit versehen. Wie bei der Filterpresse werden die Rahmen und Bleche

Fig. 2.



mittels einer Spindelpresse zusammengehalten und können leicht auseinander genommen werden, falls eine Reinigung oder Reparatur erforderlich werden sollte. Die Endbleche sind mit Polklemmen ausgestattet, an welche die elektrische Leitung angeschlossen wird. Für jede Kammer ist ungefähr 5 Volt Spannung in Anschlag zu bringen, so dass ein Elektrolyseur für die übliche Leitungsspannung von 100 Volt

Fig. 3.



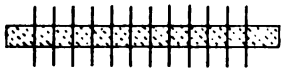
20 Kammern enthält. Der Zufluss und Abfluss der 10%igen Kochsalzlösung kann durch Hähne beliebig eingestellt werden und die Stromstärke mag ebenfalls in mässigen Grenzen schwanken. Die Temperatur der abfliessenden Bleichflüssigkeit soll aber 40° C. nicht übersteigen, dies schon mit Rücksicht auf die Hartgummirahmen, welche bei höherer Temperatur weich werden. Leider zeigte sich, dass die naturgemäss ziemlich dünn gewählten Platinbleche nach einiger

Digitized by Google

Zeit durch das abwechselnde Ausdehnen und Zusammenziehen derselben während des Betriebes rissig wurden. Ob dabei Temperaturunterschiede oder aber die durch Wasserstoffabsorption bewirkte Volumvergrösserung mehr mitspielten, kann dahingestellt bleiben. — Der Stromanteil, welcher die Zuflussöffnungen passiert, dient lediglich zur Erwärmung der Lösung und geht also nutzlos verloren. — Die Platinfolien mussten daher von Zeit zu Zeit durch neue ersetzt werden. Ueberdies erlaubt Knöflers Elektrolyseur nur die Erzeugung schwacher Bleichlösungen mit 1—2‰ Chlorgehalt, da bei höherem Gehalt der Nutzeffekt sich zu tief stellt. Der bedeutende Fortschritt dieser Konstruktion gegenüber der Hermites ist aber nicht zu verkennen und es ist wohl mehr der hohe Erstellungspreis derselben, als irgend etwas anderes der Grund dafür gewesen, dass Knöfler mit seiner Erfindung nicht durchzudringen vermochte.

Dasselbe Schicksal dürfte auch dem Apparat von C. Kellner beschieden sein. Kellner will beobachtet haben, dass der elektrische Strom lieber aus Spitzen in die Salzlösung übergeht, als aus glatten Flächen. Bei gleichem Platingewicht und sonst denselben Verhältnissen soll eine grössere Stromstärke, also eine stärkere Belastung des Platins, möglich sein als z. B. bei Knöflers Apparat. In Fig. 4 ist eine Kellnersche „Spitzenelektrode" schematisch skizziert. Eine Hartgummiplatte wird von dünnen, kurzen Platinstiften derart durchdrungen, dass die Stifte auf beiden Seiten der Gummiplatte gleich weit und vertikal darauf vorstehen. Die Oberfläche der Platte erscheint mit solchen Platinborsten besäet. Jeder Platinstift spielt hier die Rolle der doppelpoligen Elektrode, indem am einen Ende Wasserstoff, am anderen Chlor auftritt. Die Platten selbst können ähnlich wie Knöflers Folien angeordnet werden. — Eine etwas abweichende Anordnung ist in Fig. 5 gezeichnet. Die Salzlösung fliesst in schlangenförmigen Windungen an den Borstenelektroden vorbei, in der durch die Pfeile bezeichneten Richtung. Ein gewisser Stromanteil wird dabei durch die zwischen den einzelnen Kammern vorhandenen, schlitzförmigen Verbindungspforten treten und ausschliesslich zur Erhitzung der Salzlösung dienen. Es ist nicht wahrscheinlich, dass mit solchen Elektroden stärkere Bleichflüssigkeiten und mit besserem Nutzeffekt erhalten werden, als bei Knöflers Elektrolyseur. Die aus dem Gebiet der statischen Elektrizität übertragene Anschauungsweise der „Spitzenwirkung" lässt sich kaum auf elektrolytische Vorgänge an-

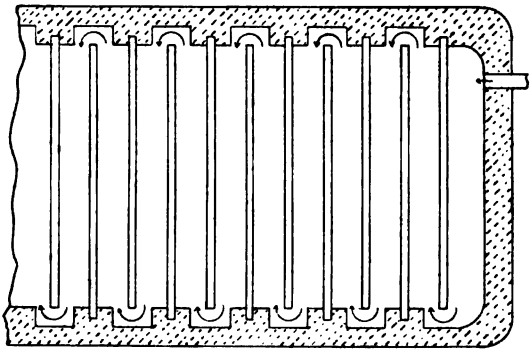
Fig. 4.



Digitized by Google

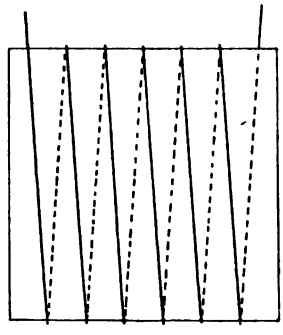
wenden, und Kellners Beobachtung scheint unzutreffend. Es hat sich im technischen Betrieb erwiesen (Papierfabrik Perlen [Luzern]), dass Kellners System zu viel Kraft beansprucht, um vorteilhaft für Papierbleichung zu dienen; auch soll die Chloratbildung hier besonders hervortreten.

Fig. 5.



Nicht viel besser scheint es mit den ebenfalls von C. Kellner erfundenen „Kantenelektroden" zu stehen. Wie Fig. 6 in schematischer Ausführung zeigt, werden solche erhalten, wenn Platindraht z. B. um Glasplatten gewickelt wird. Eine Anzahl derartig zugerichteter Platten kann ebenfalls nach Schema Fig. 5 zusammengestellt werden.

Fig. 6.



Einem Prospekt von Fr. Gebauer in Charlottenburg-Berlin über den „Elektrolyser, Patent Dr. Kellner", sind nachstehende Fig. 7 und Angaben entnommen. Die mit Platiniridiumdraht bewickelten Elektroden sind in einen Steinzeugtrog eingesetzt, welcher am Boden ein Zulaufrohr für die zu zersetzende Salzlösung aufnimmt. Nachdem die Lösung zwischen den Elektroden durchgeflossen und teilweise elektrolysirt ist, tritt dieselbe mittels Ueberlaufs aus dem „Elektrolyser" in das darunter stehende grössere Sammelgefäss. In diesem liegt eine Kühlschlange aus Hartblei, welche von kaltem Wasser durchflossen wird, zum Zweck, die im „Elektrolyser" warm gewordene Flüssigkeit wieder auf normale Temperatur zu bringen, worauf dann durch eine Zentrifugalpumpe jene von neuem in den „Elektrolyser" befördert wird, so oft oder lange, bis der gewünschte Gehalt an wirksamem Chlor erreicht worden ist. „Arbeitet man

Digitized by Google

Fig. 7.

3 Stunden mit dem Elektrolyser bei Verwendung von 650 l einer Salzlösung mit etwa 110 kg im Cubikmeter der Lösung, bei durch-

Digitized by Google

schnittlich 112 Volt und 114 Ampère, so erhält man eine Lösung von 0,85 % an bleichendem Chlor, also 5,5 kg wirksames Chlor in 650 l. Der Preis dieser Chlormenge berechnet sich wie folgt:

650 l enthalten 71,5 kg Salz (per 100 kg Mk. 1,60) . . .	Mk. 1,15
19 P.S. × 3 Stunden = 57 P.S.-Stunden (0,0235 Mk.) . .	„ 1,35
Amortisation des Apparates 10 %	„ 0,80
	Mk. 3,30

Mithin kostet 1 kg Chlor Mk. 0,60."

Der Ansatz von 2,35 Pfennig für die Pferdekraftstunde ist allerdings nur dann zutreffend, wenn billige Wasserkraft zur Verfügung steht. Vergleichshalber möge die Rechnung für den Fall, dass Dampfkraft zur Lieferung der Elektrizität verwendet werden muss, wiederholt werden. Hier kann der Preis der Pferdekraftstunde, inklusive aller damit verknüpften Unkosten, auf 8 Pfennig gesetzt werden. An manchen Orten wird er sich noch höher stellen.

Für Salz verbraucht (wie vorhin)	Mk. 1,15
An Arbeitsbetreffnis 57 × 8	„ 4,56
Für Amortisation (10 %ige)	„ 0,80
Für Verzinsung (5 %ige)	„ 0,40
Für Wartung, Schmieröl für Dynamo, 10 %ige Amortisation, 5 %ige Verzinsung der Dynamo und Leitungsinstallation	„ 1,50
Total	Mk. 8,41

(Das Kilogramm Chlor stellt sich jetzt auf Mk. 1,53, während dieselbe Chlormenge sich im Chlorkalk auf ca. 54 Pfennig stellt, wenn der Chlorkalkpreis Mk. 180 per Tonne beträgt.)

Es ist aber bereits früher dargelegt worden, dass als Einheit der Bleicheffekt zum Vergleich allein richtig ist. Da aber dem Chlor in der Bleichflüssigkeit nicht dreifache Leistung gegenüber demjenigen im Chlorkalk zugesprochen werden kann, stellt sich hiernach die elektrische Bleicherei teurer als die Chlorkalkbleiche. Der Grund hierfür ist in dem übermässigen Kraftaufwand zu suchen, welchen der vorliegende Elektrolyser beansprucht. Auf 1 kg wirksames Chlor entfällt eine elektrische Arbeit von 7 Kilowattstunden. Wenn jede Kammer des Elektrolysers ca. 6 Volt Spannung absorbiert, stellt sich der auf die Ampèrestunde bezogene Nutzeffekt auf rund 65 %.

1 kg Chlor braucht $\frac{112 + 114 + 3}{5,5} = 6964$ Wattstunden, oder $\frac{6964}{6} = 1160$ Ampèrestunden.

Digitized by Google

Aus 1160 Ampèrestunden sind theoretisch $\frac{1160}{1{,}323} = 1{,}535$ kg Chlor erhältlich. Der elektrochemische Nutzeffekt ist niedrig und die Klemmspannung zu hoch, indem, wie später gezeigt wird, dieselbe 4½ Volt nicht zu übersteigen braucht, ja sogar noch tiefer fallen kann. In allen Fällen jedoch, wo billige Kraft verfügbar ist, kann dieser Elektrolyser in ökonomischer Hinsicht sich dem Chlorkalk gleichstellen, vorausgesetzt natürlich, dass die mit 10% taxierte Amortisation hinreichend ist. Die Vorteile aber, welche mit der Verwendung elektrolytischer Bleichflüssigkeit verbunden sind, kommen immer zur Geltung. Manche Effekte sind mit aus Chlorkalk bereiteten Bleichlösungen überhaupt nicht erreichbar. Freilich steht der durch die Verwendung des im Preis dem Golde bald gleichkommenden Platins bedingte hohe Anschaffungspreis des Apparates (nach der Amortisationsquote zu schliessen, stellte sich ein Elektrolyser für 112 Volt und 114 Ampère annähernd auf 10,000 Mark) der Einführung in die Technik ebenfalls hindernd im Wege.

Dass Platindraht, an Stelle von Platinblech, eine höhere Belastung zuliesse, ähnlich wie dies für die Borstenelektroden der Fall sein soll, ist jedenfalls gerade so unzutreffend wie bei diesen. — Um stärkere Bleichflüssigkeiten, z. B mit 1% Gehalt aktivem Chlor und darüber zu erzeugen, eignet sich dieser Elektrolyser ebensowenig als Knöflers Apparat, indem mit jedem per Mille zunehmendem Chlorgehalt der Lösung die aufzuwendende elektrische Arbeit unverhältnismässig rasch ansteigt, so dass der Nutzeffekt bei der Erzeugung z. B. 1%iger Bleichlösungen bereits auf eine praktisch nicht mehr zulässige Tiefe sinkt. Der Fortschritt gegenüber Knöflers Apparat ist ziemlich gering und deshalb hat sich dieses System nur vereinzelt in Bleichbetriebe einführen können.

Die Bleichkufe von Haas und Stahl enthält nicht mehr Platin, sondern Graphitkohle als Elektrodenmaterial und verdient deshalb besondere Berücksichtigung. Die in Fig. 8 enthaltene Abbildung ist dem Prospekte der „Elektrizitätsgesellschaft Haas & Stahl“ in Aue (Sachsen) entnommen. Die anschliessenden schematischen Skizzen Fig. 9 bis 15 sind nebst zugehörigen Erläuterungen aus den Patentschriften D.R.P. Nr. 101296 und D.R.P. Nr. 105054 geschöpft.

Fig. 8 zeigt den länglichen Trog drehbar auf einem Eisengestell; die Längswände des Gefässes sind mit Nuten versehen, welche als Führung für die doppelpoligen Elektroden dienen. Diese selbst bestehen aus besonders präparierten Kohlen und stehen in regel-

Digitized by Google

mässigen Abständen, senkrecht und parallel zueinander im Troge. Die Kohlenplatten reichen aber nicht bis zum Boden des Troges, sondern ruhen vermittelst isolierender Stützen auf diesem auf. Die Salzlösung tritt am besten durch einen Regulierhahnen in die am meisten nach rechts gelegene Kammer des Apparates ein und durchfliesst diesen, um schliesslich durch das auf der linken Seite befindliche Ueberlaufrohr auszutreten. Die innere Einrichtung des Elektrolyseurs wird vielleicht durch Fig. 9 verdeutlicht, in welcher die Richtung des senk-

Fig. 8.

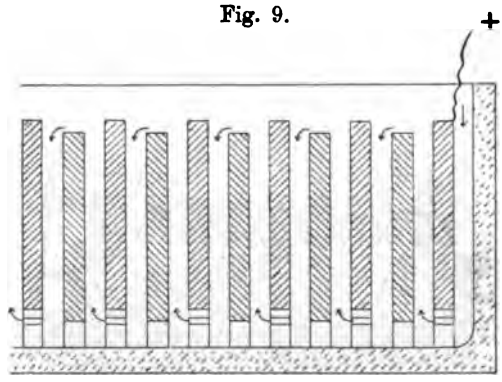
recht auf- und absteigenden Flüssigkeitsstromes durch Pfeile angezeigt ist. — Fig. 10 und 11 zeigen senkrecht zur Längsrichtung des Apparats geführte Schnitte. Die am Boden liegenden isolierenden Träger für die Platten sind abwechselnd massiv und durchbrochen. Dadurch, dass die Durchlassöffnungen etwas über der Bodenfläche angeordnet sind, wird die Zirkulation der Flüssigkeit nicht bis ganz auf den Boden des Gefässes ausgedehnt und es entstehen ruhige Säcke, in welchen sich der durch die allmähliche Desintegration der Kohlen bildende Schlamm absetzen kann. Von Zeit zu Zeit kann letzterer durch Um-

Digitized by Google

kippen des Troges und Ausspülen mittels eines kräftigen Wasserstrahls entfernt werden.

Eine andere Art der Zirkulation der Salzlösung wird durch Fig. 12 und 13 veranschaulicht; hier fliesst die Lösung in senkrechter Richtung zu den Plattenflächen durch den Apparat. Die Kohlenplatten sind

Fig. 9.



dabei mit symmetrisch über die Oberfläche verteilten Durchbohrungen versehen.

Im einen wie im anderen Falle befindet sich bei der Einlaufstelle, wie auch unmittelbar vor dem Ueberlauf ein Thermometer, und aus der Differenz der beiden Anzeigen kann auf den Gehalt der

Fig. 10.

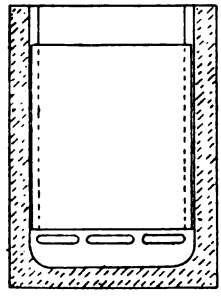
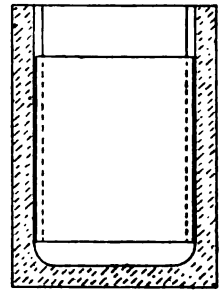


Fig. 11.



Bleichflüssigkeit an wirksamem Chlor geschlossen werden. Im Falle, dass Kohlenschlamm von der Bleichlösung mitgeführt wird, kann dieser durch ein Glaswollfilter abgeschieden werden, was sich wohl immer empfehlen wird.

In einem Falle wurde ein solcher Apparat mit 30 Ampère und 110 Volt Spannung während 10 Stunden betrieben unter Verwendung

Digitized by Google

von 10%iger Salzlösung und als Resultat 1000 l Bleichflüssigkeit mit 0,3% Gehalt an wirksamem Chlor erhalten. Auf 1 kg Bleichchlor entfallen mithin 10 Kilowattstunden, also noch mehr als beim Kellnerschen Elektrolyser. Die Ursache hiervon liegt in der Natur der Kohlenelektroden, indem, unter sonst denselben Umständen, an diesen sich mehr Chlorat bildet als bei Platinelektroden. — Dagegen ist der Kostenpreis solcher Apparate ungleich niedriger als bei solchen mit Platin, was indessen auf die Betriebskosten nicht zutreffend ist. Es ist wahr-

Fig. 12.

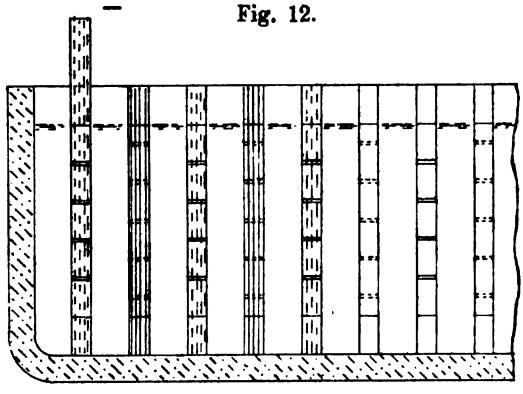
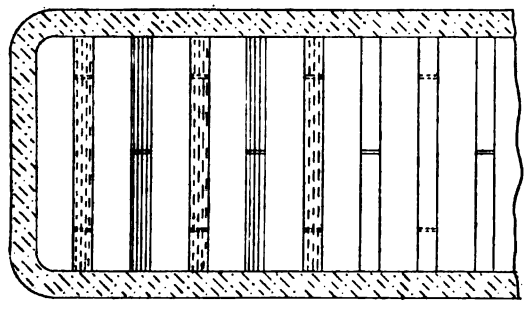


Fig. 13.



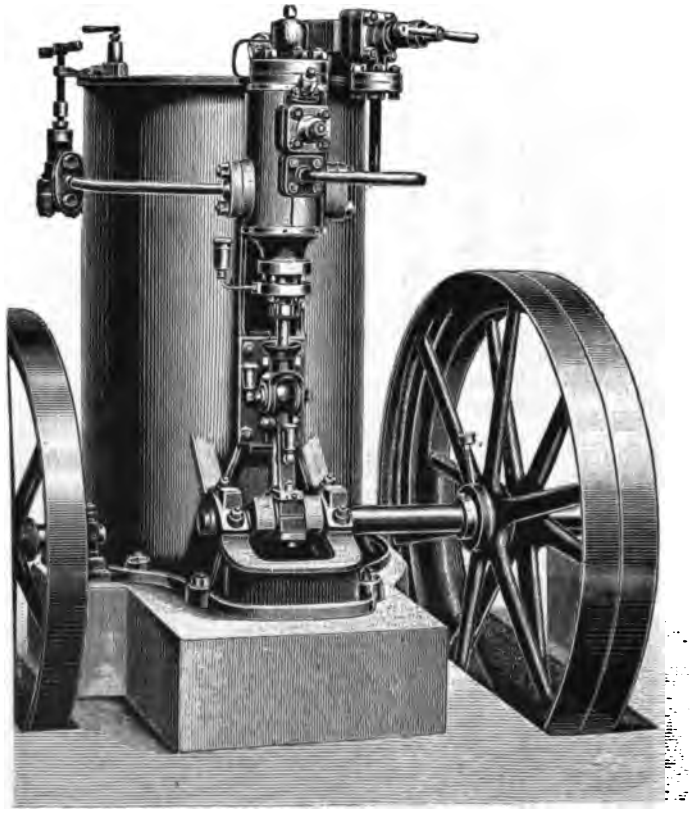
scheinlich, dass die Haltbarkeit der Kohlen- resp. Graphitplatten noch zu wünschen übrig lässt und daher durch den Ersatz derselben gleiche oder höhere Auslagen entstehen, als die Amortisation von Platinapparaten beträgt.

Den bis jetzt behandelten elektrolytischen Einrichtungen haftet ein gemeinsamer Uebelstand an; es kann nur ein geringer Bruchteil des in der Lösung enthaltenen Salzes wirklich in die das aktive Chlor enthaltende Bleichsubstanz (unterchlorigsaures Natron?) mit praktisch

Digitized by Google

annehmbarem Nutzeffekt übergeführt werden. Bei dem auf S. 213 erwähnten Beispiel mit Kellners Elektrolyser sind von der angewandten Salzmenge (71,5 kg) nur 9,06 kg endgültig in Bleichsubstanz übergeführt worden, also 12½ %, ein zu niedriger Anteil. Dies kommt einer Salzverschwendung gleich, indem die einmal gebrauchte Bleichflüssigkeit nicht, wie wohl hie und da vorgeschlagen

Fig. 14.



worden ist, abermals elektrolysiert werden kann. Es finden sich in solch gebrauchter Lösung organische Stoffe, vom Farbstoff und der Faser selbst herrührend, welche am besten mit der Lösung beseitigt werden. Nun ist andererseits, wie später ausgeführt wird, eine vollkommene Umwandlung alles Salzes in der Lösung nicht möglich, aber die Hälfte des Salzgehaltes sollte doch in Bleichsubstanz übergeführt werden können. In dieser Hinsicht bedeutet der **S-Elektrolyser**

Digitized by Google

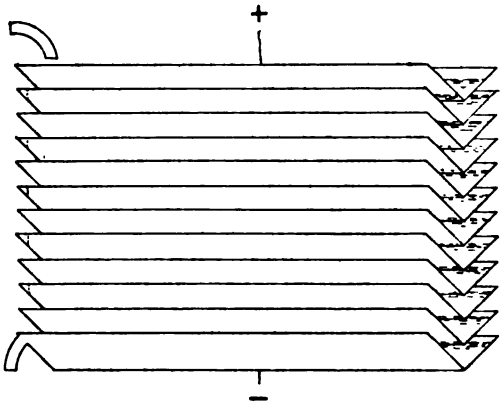
einen Fortschritt. Das Prinzip dieser elektrischen Zersetzungszelle mag aus dem ungarischen Patent Nr. 17134 entnommen und durch die Fig. 15 bis 17 erläutert werden. Durch den erheblichen Widerstand, den verdünnte Salzlösung der Elektrolyse entgegensetzt, findet eine namhafte Erwärmung der Flüssigkeit statt, welche besonders bei der Herstellung kräftigerer Bleichlaugen bemerkbar wird. Zur Bleiche von Halbzeug für Papierfabriken, wo der Stoff im Holländer mit dem Bleichagens zusammengebracht wird, muss die Bleichflüssigkeit immerhin 1 bis 1½ % wirksames Chlor enthalten. Da empfiehlt es sich, die Salzlösung schon vor dem Eintritt in den Zersetzer so gut als möglich abzukühlen, auf 0° C. oder noch einige Grade tiefer. Dies ist mit gewöhnlichem Leitungswasser natürlich unmöglich; es bedarf dazu einer Kälte- oder Eismaschine. Die Salzlösung fliesst zuerst durch eine Bleikühlschlange, welche in einem Bottich mit destilliertem Wasser steht. Dieses letztere wird durch eine in demselben Bottich und konzentrisch zur Bleischlange gelagerte zweite Kühlschlange aus Eisenrohr, welche zugleich als Verdampfer für das Kältemittel dient, abgekühlt. Fig. 14 stellt eine kleinere Kältemaschine für 3 bis 5 Pferdekräfte dar; es dient hier flüssige Kohlensäure als Uebertragungsmittel, welche den Vorteil hat, dass die Maschinen klein und billig ausfallen, aber den Nachteil, dass infolge des hohen Druckes Verluste durch Undichtigkeit eher in die Wagschale fallen, als bei den mit niedrigem Druck arbeitenden, daher grösseren und teureren Ammoniakkältemaschinen. Der im Kompressor vorhandene Druck schwankt bei Kohlensäuremaschinen zwischen 50 bis 60 Atmosphären, je nach der Temperatur des denselben umgebenden Kühlwassers. — Während an kalten Wintertagen das Bedürfnis zur Kühlung der Salzlösung fast verschwindet, kann dasselbe bei heisser Sommertemperatur derart auftreten, dass die Kühlmaschine bis zu ein Viertel der für den Betrieb des Zersetzers erforderlichen Kraft beansprucht. Natürlich hängt es auch davon ab, mit welcher Temperatur die Bleichflüssigkeit in jedem Fall verwendet werden darf.

Fig. 15 zeigt eine schematische Skizze eines Zersetzers, bei welchem die doppelpoligen, aus dünnem Platinblech bestehenden Elektroden rechtwinkelig gebogene Rinnen bilden, die senkrecht übereinander und so nahe beisammen stehen, dass immer die untere Kante jeder Rinne noch in den Flüssigkeitsspiegel in der nächst tiefer liegenden Rinne eintaucht. Der Abstand der Rinnen voneinander beträgt etwa 5 mm. Die Salzlösung, welche bei diesem System nur 5 %ig genommen wird, fliesst bei der obersten Rinne am einen Ende zu und tritt am gegenüberliegenden Ende durch eine Ueberlauföffnung aus und in die

Digitized by Google

nächst tiefer liegende Rinne. Nachdem die Lösung diese der Längsrichtung nach durchflossen hat, gelangt jene durch den in der Figur punktierten Ueberlauf in die drittoberste Rinne und so weiters, bis schliesslich die fertige Bleichflüssigkeit bei der untersten Rinne abläuft. Die oberste Rinne ist mit dem positiven Pol, die unterste mit dem negativen Pol einer Gleichstromdynamomaschine verbunden. Dadurch, dass die Elektroden so nahe beisammen liegen, wird der Wider-

Fig. 15.



stand der Anordnung möglichst verringert, so dass für jede Rinne, welche hier den Kammern in den vorgängig geschilderten Apparaten entsprechen, nur 4 ½ Volt in Anschlag zu bringen sind. Ein Apparat für 100 Volt Spannung enthält 22 solcher Rinnen. — Es kann auch Graphitkohle als Elektrodenmaterial verwendet werden, wobei die Rinnen den in Fig. 17 dargestellten Querschnitt erhalten und die übrige

Fig. 16.

Anordnung derselben gerade wie bei Fig. 15 erfolgt. Die entwickelten Gase können auch hier leicht entweichen, da dieselben nur eine flache Flüssigkeitsschichte zu passieren haben, und Schäumen der Lösung kommt deshalb nicht vor.

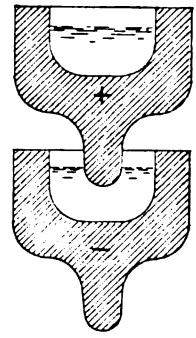
Anstatt die Rinnen übereinander zu lagern, können dieselben nebeneinander liegen, wie durch Fig. 16 verdeutlicht wird. In diesem Falle zeigen die Elektroden einen Z-förmigen, oder, um an Elektrodenmaterial

Digitized by Google

zu sparen, besser noch S-förmigen Querschnitt. Die Arbeitsweise ist bei diesem Zersetzer sonst ähnlich wie bei dem in Fig. 15 gezeigten.

Der S-Elektrolyser zeigt drei neue Eigenschaften, welche denselben als Fortschritt gegenüber den behandelten Apparaten erscheinen lassen. Einmal wird die zu elektrolysierende Salzlösung in Flüssigkeitsfäden mit geringem Querschnitt gespalten, so dass eine ziemlich rasche Strömung der Lösung möglich ist, durch welche im Verein mit den längs den Rinnen aufsteigenden Gasblasen auf automatische und gründliche Weise der Entmischung des Elektrolyten begegnet wird. Im Zusammenhang damit ist der Elektrodenabstand auf einen geringen Bruchteil der bei den Plattensystemen nötigen Abmessungen reduziert. Endlich ist hier zum ersten Male das Prinzip ungleich grosser Elektrodenoberflächen bei Bleichapparaten eingeführt. Dadurch, dass der Kathodenseite eine geringere Ausdehnung gegeben ist als der Anodenseite, wird der Rückverwandlung bereits gebildeter Bleichsubstanz wirksam vorgebeugt und die Erzeugung konzentrierterer Chlorlösungen mit gutem Nutzeffekt ermöglicht. — Durch einen S-Elektrolyser, welcher mit 100 Ampère bei 110 Volt Spannung betrieben wird, wurden im Laufe von 18 Stunden 4400 l Bleichflüssigkeit mit 1 % wirksamem Chlor aus 6 %iger Kochsalzlösung erzeugt. Pro Kilogramm wirksames Chlor wird eine Arbeitsleistung von 4,5 Kilowattstunden erfordert. Wurde derselbe Zersetzer mit 10 %iger Salzlösung betrieben und nur auf Bleichlösung mit 0,8 % aktivem Chlor gearbeitet, dann stellte sich die Arbeitsleistung pro Kilogramm Chlor auf 4 Kilowattstunden. Der elektrochemische Nutzeffekt dieses Zersetzers beträgt bei Verwendung 5- bis 10 %iger Salzlösung unter den üblichen, für den regulären Betrieb gültigen Verhältnissen

Fig. 17.



ca. 90 %,	wenn die	Bleichflüssigkeit	1 ‰	aktives	Chlor	enthält,		
„ 88 %,	„ „	„	3 ‰	„	„	„	}	5 %ige Lösung
„ 85 %,	„ „	„	5 ‰	„	„	„		
„ 80 %,	„ „	„	7 ‰	„	„	„		
„ 76 %,	„ „	„	9 ‰	„	„	„	}	6 %ige Lösung
„ 75 %,	„ „	„	11 ‰	„	„	„		
„ 70 %,	„ „	„	13 ‰	„	„	„	}	10 %ige Lösung
„ 66 %,	„ „	„	15 ‰	„	„	„		

Zum eigentlichen Bleichen mit der elektrolytisch erzeugten Bleichlösung dienen dieselben, bei der Chlorkalkbleiche angewandten

Digitized by Google

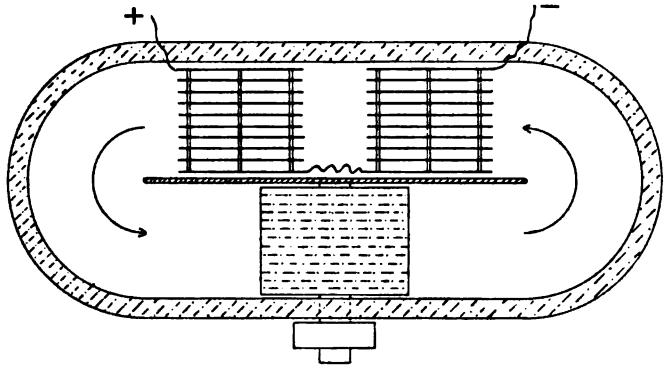
Vorrichtungen. Als Sammelbehälter für die Lösung sind Cementcisternen üblich, von welchen aus dieselbe in die Holländer geleitet wird behufs Mischung mit dem zu bleichenden Zeug. Aus den Holländern wird der Brei in Kufen abgelassen und darin, je nach der Qualität des Stoffes, eine bis mehrere Stunden sich selbst überlassen, bevor die Flüssigkeit entfernt und das Bleichgut ausgewaschen wird. Die Vorbehandlung des Zeuges bleibt dieselbe wie bisher. Elektrolytisch gebleichter Stoff ist beim Leimen ungleich angenehmer als mit Chlorkalk gebleichter. — Für Gespinnstfasern braucht die Bleichlösung nicht sehr stark zu sein, so dass, wenn Baumwollgarn auf Spulen (Cops, Bobines) zu bleichen ist, 4 bis 8 ‰ Chlorgehalt ausreicht, während lose Baumwolle schon bei 2 bis 4 ‰iger Lösung vollkommen weiss wird. Bei Baumwollgarnen, wie Strickgarn, genügt ½ % Chlorgehalt, wenn nach dem englischen Verfahren das Garn in Päcken im Bäuchapparat gebleicht wird. Das vorherige Bäuchen mit heisser 1 %iger Natronlauge ist ebenfalls erforderlich, wie auch das nachherige Absäuern mit ½ %iger Schwefelsäure. Die gebleichte Ware lässt sich aber leichter vom Chlor auswaschen und zeigt überaus weichen Griff. — Hanfgarn, welches zuerst mit 1 %iger Sodalösung abgekocht worden war, konnte in 2 ‰iger Lösung ganz weiss gebleicht werden, wobei allerdings das Flüssigkeitsvolum und die Expositionszeit entsprechend reichlich bemessen wurden. Für Jute und Ramie, welche mit Chlorkalk überhaupt nicht gut gebleicht werden können, empfiehlt sich vorherige Behandlung mit warmem Seifenwasser, welches den Bast löst und (bei Jute) auch die durch das „Patschen" verursachte Beimischung von Petroleum entfernt. Die ausgewaschene Faser verträgt aber nur schwache Bleichlösungen mit 1 ‰ Chlor. — Auch Stroh, Wachs, Leinöl lassen sich derart auf elektrolytischem Wege bleichen. Auf die Einzelheiten, welche in jedem Falle zu beobachten sind, kann hier nicht eingegangen, sondern muss diesbezüglich auf Fachschriften verwiesen werden[1]). Je nach Natur von Farbstoff und Faser ändert sich die Vorbehandlung dieser wie auch die Anwendung der elektrolytischen Bleichflüssigkeit. Diese kann schwach alkalisch, neutral oder schwach sauer sein; im ersteren Falle mag Soda, im letzteren Kohlensäure zugefügt werden. Die durch Elektrolyse von Chlormagnesium- und Chlorcalciumlösungen erhältlichen Bleichflüssigkeiten zeigen wieder etwas abweichende Eigenschaften von den aus Kochsalzlösungen erhältlichen.

[1]) Dubosc, Le blanchiment et le blanchissage par l'électrolyse.

Digitized by Google

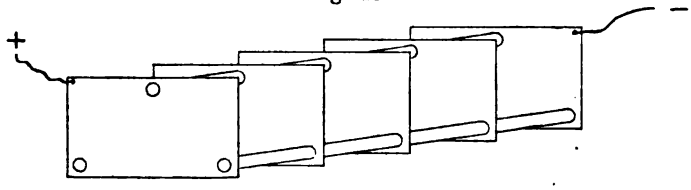
Nun ist schon von Hermite vorgeschlagen worden, das zu bleichende Material in denselben Behälter, in welchem sich bereits der Elektrolyseur befindet, zu bringen und darin zu bleichen. Nachher hat Kellner diesen Gedanken wieder aufgegriffen und in konkretere Form zu bringen gesucht. Zu diesem Zwecke soll der in Fig. 19 abgebildete „Bleichblock" dienen, welcher in höchst einfacher Art

Fig. 18.



aus mehreren parallel zu einander stehenden und an drei Ebonitstangen gemeinsam befestigten Platinblechen besteht. In Fig. 18 befinden sich zwei solcher Bleichblöcke in einem Holländer versenkt und der durch die rotierende Holländertrommel in kreisende Bewegung versetzte, mit Salzlösung anstatt Wasser angemachte Papierbrei hat

Fig. 19.



zwischen den Platinblechen hindurch zu gehen. Wahrscheinlich aber geht dies nicht.

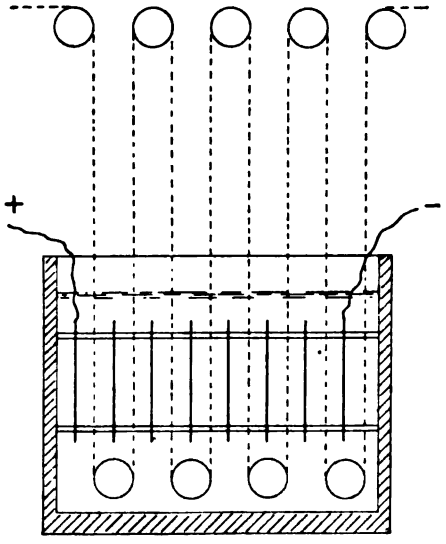
Ebenso problematisch erscheint die in Fig. 20 skizzierte, ebenfalls von Kellner vorgeschlagene Vorrichtung zum Bleichen von Baumwollgeweben. Hier schlängelt sich das Gewebe als Band zwischen den Platinblechen des „Bleichblocks" hindurch und wird dabei durch passend angebrachte Rollen oder Walzen geführt. Infolge des notwendigerweise grösseren Abstandes der Bleche voneinander und des Umstandes,

Digitized by Google

dass diese nach allen Seiten sozusagen frei in der Salzlösung stehen, wird der grössere Teil der zugeleiteten Elektrizität in Wärme übergeführt werden und der Nutzeffekt des Bleichblocks allzu bescheiden ausfallen. Hier ist, wie in so vielen Fällen, offenbar das Patent dem Experiment vorangeeilt.

Dagegen hat Goppelsröder für die Bleiche von Kattunstoffen ein Verfahren ersonnen, bei welchem der mit Salzlösung oder einem

Fig. 20.



anderen Chlorid imprägnierte Stoff zwischen zwei Walzen, die als Elektroden funktionieren, hindurchgelassen wird. Es können die beiden Walzen mit Platin überzogen sein, oder aus Kohle bestehen, oder die eine der Walzen, die Kathode, mag nach dem Beispiel von Hermite aus Zink bestehen. Es muss die Platinwalze mit dem positiven Pol, die gegenüberliegende Walze mit dem negativen Pol einer Stromquelle, welche in diesem Fall vielleicht 6 Volt Spannung haben mag, verbunden werden.

Digitized by Google

Theoretische Betrachtungen.

Die für Bleichflüssigkeit verwendbaren Salze können in zwei Gruppen eingeteilt werden, wobei diejenigen, welche an der Kathode unlösliche Körper abscheiden, zuerst erörtert werden sollen. Hierher gehören Chlormagnesium, Chlorcalcium und Carnallit. Bei der elektrolytischen Zersetzung von verdünnten Chlormagnesiumlösungen zwischen Platinelektroden und bei gewöhnlicher Temperatur kann alsbald an der Kathode ein gelatinöser Körper, Magnesiumhydroxyd, beobachtet werden, während Wasserstoffblasen von derselben in die Luft entweichen. An der gegenüberliegenden Anode scheiden sich nach Hermite Chlorsauerstoffverbindungen, wie Unterchlorsäure, chlorige Säure und Chlorsäure aus. Hermite scheint die energisch bleichende Kraft seiner elektrolytischen Chlormagnesiumlösung der chlorigen Säure zuzuschreiben. (Nach dessen Vorschrift wird der ca. 6 %igen Chlormagnesiumlösung ein Zusatz von künstlich bereitetem Magnesiumhydroxyd gemacht, wobei dieser ungemein voluminöse Körper sich während der Elektrolyse allmählich auflöst. Dadurch wird die Flüssigkeit offenbar neutral erhalten.) Nun besteht wenig Zweifel, dass der Strom das Chlormagnesium einfach in dessen Elemente, Magnesium und Chlor, spaltet, welche nur deshalb nicht sichtbar werden, weil das vorhandene Wasser augenblicklich auf die ursprünglichen Ionen reagirt.

Magnesium zersetzt Wasser nach den durch nachfolgende Gleichung gegebenen Verhältnissen:

$$\underset{\text{Magnesium}}{Mg} + \underset{\text{Wasser}}{\begin{matrix}OHH\\OHH\end{matrix}} = \underset{\text{Magnesium-hydroxyd}}{Mg\begin{matrix}OH\\OH\end{matrix}} + \underset{\text{Wasserstoff.}}{\begin{matrix}H\\H\end{matrix}}$$

Das Chlor löst sich im Wasser auf zu Chlorhydrat, $Cl_2 + 6H_2O$. Ist die Temperatur der Lösung einige Grade unter Null, so kann an der Anode ein gelblicher Niederschlag aus krystallisiertem Chlorhydrat beobachtet werden. Bei Temperaturen über Null Grad zersetzt sich das Chlorhydrat und kann dabei sowohl unterchlorige Säure als chlorige Säure liefern.

$$\underset{\text{Chlor}}{\begin{matrix}Cl\\Cl\end{matrix}} + \underset{\text{Wasser}}{\begin{matrix}H\\OH\end{matrix}} = \underset{\text{Unterchlorige Säure}}{ClOH} + \underset{\text{Salzsäure}}{HCl}$$

Digitized by Google

ferner

$$\begin{matrix} Cl \\ Cl \\ Cl \\ Cl \end{matrix} + \begin{matrix} H \\ HO \\ H \\ HO \end{matrix} = \underset{\text{Chlorige Säure}}{ClO_2H} + \underset{\text{Salzsäure.}}{3\,HCl}$$

Das Magnesiumhydroxyd an der Kathode neutralisiert zuerst die entstandene Salzsäure und der ausserdem gemachte Zusatz von Magnesiahydrat erleichtert die rasche und vollständige Neutralisation der gebildeten sauren Produkte.

Ganz analog kann die Elektrolyse von Chlorcalciumlösungen (welche bei dem Solvay-Sodaprozess in grossen Massen als Nebenprodukt abfallen) betrachtet werden, wobei an Stelle des Magnesiumhydroxyds einfach Calciumhydroxyd tritt. Das Kalkhydrat bildet ebenfalls teilweise schwer lösliche Krusten um die Kathode, so dass auch hier durch zugesetzten Magnesiaschlamm die Flüssigkeit besser neutral erhalten wird. Infolge der geringen Acidität der gebildeten Chlorsauerstoffverbindungen, der bedeutenden Verdünnung und niedrigen Temperatur ist anzunehmen, dass die Neutralisation derselben mit Magnesiumhydroxyd langsam und unvollkommen geschehe, so dass die Bleichflüssigkeit einen gewissen Prozentsatz freier unterchloriger Säure oder chloriger Säure enthalten wird. Dieser Umstand mag zum Teil für die energischere Wirkung solcher Lösungen gegenüber den aus Kochsalzlösungen erhaltenen Bleichflüssigkeiten verantwortlich gemacht werden.

Das Hauptinteresse aber kommt der Kochsalzzersetzung zu. Das Chlornatrium zerfällt in seine Elemente, Chlor und Natrium, wobei letzteres mit Wasser sich in Natriumhydroxyd und Wasserstoff umsetzt. Die für Chlormagnesium eben aufgestellten Vermutungen können auch hier Platz finden. Die gebildeten Chlorsauerstoffkörper werden aber durch das Natronhydrat glatt neutralisiert und in Salze, nämlich Natriumhypochlorit resp. Natriumchlorit übergeführt. Die elektrolysierte Lösung zeigt stets deutlich alkalischen Charakter in dem Grade, wie etwa eine Sodalösung von ähnlichem Prozentgehalt. Wenn jetzt, wie im nachfolgenden, von gebildetem Hypochlorit gesprochen wird, geschieht dies einesteils deshalb, weil der das wirksame Chlor enthaltende Bleichkörper vermutlich dieselbe quantitative Zusammensetzung zeigt wie das dem Chemiker bekannte Hypochlorit, also isomer mit diesem ist, und weil andererseits über die wahre Konstitution des Bleichkörpers noch keine Aufschlüsse vorliegen. Wenn ferner die Neutralisation des abgeschiedenen Chlors mit dem kathodischen Natron-

Digitized by Google

hydrat auf analoge Weise behandelt wird, als ob es sich z. B. um das Einleiten von Chlorgas in schwache, mit Kochsalz versetzte Natronlauge handelte, muss wieder daran gedacht werden, dass diese Parallele nicht wahrhaftig gültig sein kann, schon deshalb nicht, weil das an der Anode auftretende Chlor nicht Molekülarform zu haben braucht.

In der That erscheint zum gegenwärtigen Zeitpunkt der wahre Mechanismus der Kochsalzelektrolyse noch lange nicht endgültig aufgeklärt. Auf die Spekulationen, welche Anhänger der neueren Ionentheorie namentlich in letzter Zeit über vorliegenden Gegenstand angestellt haben, verlohnt es sich nicht einzutreten, da fast mit Sicherheit zu erwarten ist, dass diese nach einiger Zeit umgestossen werden. Für die technische Seite der Frage können keine neuen oder belehrenden Parallelen oder Schlüsse daraus gezogen werden. Ueber die Elektrolyse einigermassen verdünnter Kochsalzlösungen scheinen überhaupt keine zuverlässigen Experimentaluntersuchungen vorzuliegen.

Wenn die elektrolytische Zersetzung des Kochsalzes glatt verliefe, müsste sich die Bildung des Bleichkörpers der Formel

$$\begin{matrix} Cl \\ Cl \end{matrix} + \begin{matrix} NaOH \\ NaOH \end{matrix} = NaOCl + NaCl + H_2O$$

71 Chlor | Natronhydrat | 74,5 Hypochlorit | Kochsalz | Wasser

entsprechend vollziehen, und für jede Ampèrestunde würden 1,323 g Chlor pro Zelle abgeschieden. In Wirklichkeit treten aber einige Nebenerscheinungen auf, welche die theoretische Ausbeute nicht erreichen lassen. Es sind dies:

1. Oxydation des Bleichkörpers über das Hypochlorit resp. Chlorit hinaus (Chloratbildung),

2. Reduktion des schon gebildeten Bleichkörpers (Rückverwandlung in Kochsalz),

3. elektrolytische Zersetzung der an der Kathode auftretenden Produkte (Natronhydrat),

4. elektrolytische Zersetzung der an der Anode auftretenden Produkte (Salzsäure und Chlorsauerstoffkörper).

Die Chloratbildung kann nie vollkommen unterdrückt werden. Auf chemischem Wege wird Natriumchlorat erhalten, wenn Chlorgas im Ueberschuss in Natronlauge geleitet wird. Hierbei entsteht zuerst Hypochlorit und erst bei weiterem Chlorzutritt tritt die Bildung des

Digitized by Google

Chlorats in den Vordergrund. Die erste Phase dieses Prozesses ist bereits in der oben stehenden Gleichung enthalten; hier ist die zweite Phase formuliert:

$$NaOCl + 4\,NaOH + 2\,Cl_2 = 4\,NaCl + 2\,H_2O + NaClO_3$$

(Natriumchlorat).

Es soll aber damit nicht gesagt sein, dass diese beiden Phasen scharf voneinander zu trennen seien. — Die Fabrikation von Chlorat wird schon lange nur noch auf elektrolytischem Wege durchgeführt und es ist interessant, dass mit demselben Apparat, je nachdem die Bedingungen gewählt werden, entweder Chlorat oder Bleichflüssigkeit erzeugt werden kann. Die für Chloratbildung günstigen Momente sind: Hohe Temperatur, möglichste Konzentration und alkalische Reaktion der Salzlösung, ferner grosse Stromdichte. Die Umstände sind also in unserem Fall zu vermeiden und für die Bleichflüssigkeit niedrige Temperatur, angemessene Verdünnung und Neutralität der Salzlösung anzustreben.

R. Häussermann hat diese verschiedenen Faktoren durch einen sehr passenden Demonstrationsapparat zum Ausdruck gebracht. — Bei der Chloratfabrikation, für welche Carnallit, aber auch Chlormagnesium allein oder Chlorcalcium als Rohmaterial dem Kochsalz vorzuziehen ist, werden der Lösung vorteilhaft Zusätze, wie Kalkmilch, Soda, Chromat, Salpeter gemacht.

Die Reduktion des Bleichkörpers erfolgt, wenn das an der Kathode frei werdende Natrium auf diesen trifft und kann vielleicht durch die Formel

$$NaOCl + \begin{matrix}Na\\Na\end{matrix} + \begin{matrix}H\\O\\H\end{matrix} = NaCl + 2\,NaOH$$

Hypochlorit Natrium Wasser Kochsalz Natronhydrat

ausgedrückt werden. Danach darf man schliessen, dass neutrale oder schwach saure Reaktion der Bleichflüssigkeit der Reduktion förderlich sei, alkalische dagegen vorbeugend wirke. Das Wasserstoffgas hat keinerlei Wirkung. Es ist leicht begreiflich, dass die Reduktion um so mehr hervortritt, je grösser der Gehalt der Flüssigkeit an Bleichkörper oder wirksamem Chlor ist. Bei einem gewissen Prozentsatz der Salzlösung an Hypochlorit tritt ein Punkt ein, bei dem in der Zeiteinheit gerade so viel Hypochlorit reduziert wird, als sich an der Anode bildet. (Auf anderem Wege kommt F. Oettel zum Schluss, dass eine Bleichlösung mit 1,27 g Chlor in 100 ccm das Maximum des Er-

Digitized by Google

reichbaren vorstelle; dies kann aber nur mit Bezug auf die betreffende Versuchsanordnung gültig sein.) Als Mittel, die Reduktion einzuschränken, schlägt derselbe Autor vor, die Stromdichte der Elektroden möglichst hoch zu nehmen (bei 20%iger Chlorkaliumlösung 14 Ampère per Quadratdecimeter Kathodenfläche). Diese empirische Regel kann dahin gefasst werden, die Bleichlösung so kurze Zeit als möglich mit der Kathode in Berührung zu lassen, welche Forderung durch konstruktive Ausbildung der Elektroden zum Teil erfüllt werden kann. — Laudin schlägt vor, der Lösung solche Metallchloride zuzusetzen, welche in zwei verschiedenen Chlorstufen vorkommen, während Müller Zusatz von Chromsäure für vorteilhaft findet. — Die Anwendung von Diaphragmen kann aus mancherlei Gründen hier nicht ratsam erscheinen.

Bei Chlormagnesium- und Chlorcalciumlösungen tritt Reduktion in viel geringerem Grade auf als bei Kochsalzlösungen, teilweise wohl deshalb, weil die Kathode sich mit einem Ueberzug von Hydrat bekleidet, welcher den Zutritt der hypochlorithaltigen Flüssigkeit zu jener erschwert. Andernteils mag die Reaktionsgeschwindigkeit, mit welcher das in der Grenzschichte zur Abscheidung gelangende Calcium bezw. Magnesium sauerstoffentziehend auf die Bleichsubstanz wirkt, erheblich kleiner sein als bei Natrium oder Kalium.

Die Zersetzung von Natronhydrat oder der Anteil, mit welchem die an der Kathode entstehende Natronlauge an der Stromleitung partizipiert, ist schwierig für sich allein zu ermitteln. Die bei der Elektrolyse sichtbar auftretenden Produkte sind Wasserstoff und Sauerstoff. Diese Gase sind als Mass für die Wasserzersetzung benutzt worden, da scheinbar Wasser in seine Elemente gespalten wird. Aber dieselben Gase treten auch auf, wenn Hypochlorit elektrolytisch zerlegt wird. Wasserstoff tritt auch als Kation bei der Zersetzung von Salzsäure auf. Weder das an der Anode entwickelte Sauerstoffvolum, noch das an der Kathode aufgefangene Wasserstoffvolum kann sichere Anhaltspunkte zur quantitativen Bestimmung der Natronhydratelektrolyse abgeben. Es müsste denn die dem Bleichkörper zukommende elektrolytische Leitfähigkeit Null sein, was aber weder bewiesen noch wahrscheinlich ist. — Es gibt aber einen Weg, die dem Natronhydrat sonst zukommende elektrolytische Leitung zu beseitigen, nämlich dadurch, dass das entstehende Natronhydrat sogleich vernichtet wird. Dies geschieht z. B. durch einen geringen Zusatz von Magnesiumchlorid zur Kochsalzlösung (oder irgend eines anderen Chlorides, das unlösliches Oxydhydrat liefert). An Stelle des löslichen, gut leiten-

Digitized by Google

den Natronhydrats tritt dann unlösliches, nicht leitendes Magnesiumhydroxyd und durch Parallelversuche mit und ohne Chlormagnesiumzusatz werden sich erst Schlüsse auf die Natronhydratzersetzung ziehen lassen. — Eine andere Methode bestände darin, die Salzlösung mit Kohlensäure gesättigt zu erhalten und so das Natronhydrat in sehr schlecht leitendes Bicarbonat überzuführen. Die Kochsalzelektrolyse bietet noch ein weites Feld für experimentelle und spekulative Arbeiten!

Der einfachste und natürlichste Weg, diese sogenannte „Wasserzersetzung" einzuschränken, besteht darin, das Natronhydrat durch die an der Anode gebildeten sauren Produkte zu neutralisieren, worauf ja auch die Herstellung des Bleichkörpers hinausläuft. Die Wichtigkeit der fortwährenden und möglichst augenblicklichen Mischung der Flüssigkeit resp. der darin gelösten Ionen leuchtet daher ein. — Im D.R.P. Nr. 110420 wird vorgeschlagen, der Salzlösung Thonerdehydrat zuzusetzen, welches eine neutralisierende Wirkung nach beiden Seiten, auf das Natronhydrat wie auf die Anodenprodukte, ausüben soll. Aehnlich wird sich Zinkhydroxyd verhalten. — In welchem Masse das Hypochlorit (resp. Chlorit, Bleichkörper) sich an der Leitung des Stromes beteiligt, darüber finden sich in der Litteratur keine Anhaltspunkte. Es ist nur zu vermuten, dass die gebildeten bleichenden Chlorsauerstoffsalze erheblich geringere Leitfähigkeit als das Kochsalz haben, und vielleicht in eine Ordnung mit Natronbicarbonat, borsaurem Natron etc. fallen.

Die elektrolytische Zersetzung des Hypochlorits wird wohl nach dem Schema der Sauerstoffsalze geschehen:

$$\begin{matrix} NaOCl \\ NaOCl \end{matrix} = \begin{matrix} Na \\ Na \end{matrix} + Cl_2O_2 = \begin{matrix} Na \\ Na \end{matrix} + Cl_2O + O$$

Hypochlorit Natrium

und mit Zuziehung der Wassereinwirkung auf diese Produkte:

$$\begin{matrix} Na \\ Na \end{matrix} + \begin{matrix} HOH \\ HOH \end{matrix} = H_2 + 2\,NaOH \quad \text{und} \quad Cl_2O + HOH = 2\,ClOH.$$

Bei der Mischung entsteht wieder Hypochlorit, so dass das Endresultat wie beim Natronhydrat einer „Wasserzersetzung" gleichkommt. Vielleicht gelingt es einmal, den Bleichkörper in eine unlösliche oder schwerlösliche Form überzuführen und so in dem Masse aus der elektrolytischen Lösung zu entfernen, als sich derselbe bildet, wodurch derselbe elektrolytischer Zersetzung entzogen würde. Dadurch, dass die

Digitized by Google

Salzlösung während der Elektrolyse schon in Berührung mit dem Bleichgut gebracht wird (siehe S. 223), wird allerdings der Bleichkörper ebenfalls weiterer elektrolytischer Zersetzung entzogen, aber es ist bereits ausgeführt worden, dass dieses Verfahren nicht empfehlenswert ist. — Ueber die der Salzsäure, freien unterchlorigen Säure und chlorigen Säure zufallende Rolle an der Leitung ist nichts bekannt.

Die Ermittelung des Gehalts der Bleichflüssigkeit an wirksamem Chlor

geschieht auf dieselbe Art, wie die Grädigkeit des Chlorkalks bestimmt wird, und kann hier lediglich darauf verwiesen werden. Die Stärke der Standard-Arseniklösung wird so bemessen, dass jeder Kubikcentimeter derselben 1 cg aktivem Chlor entspricht, so dass die Anzahl der verbrauchten Kubikcentimeter derselben gerade den Chlorgehalt in Promillen anzeigt, wenn 10 ccm der Bleichflüssigkeit für die Gehaltsermittelung verwendet werden.

Um das neben dem Hypochlorit stets vorhandene Natriumchlorat zu bestimmen, werden wieder 10 ccm der Bleichflüssigkeit verwendet und mit Eisenvitriol und Chamäleon die Chlorsäure, zusammen mit dem Hypochlorit, titriert. Aus der Differenz der beiden Analysen lässt sich die Chloratmenge berechnen.

Bei der genaueren und zu wissenschaftlichen Zwecken dienenden Beobachtung des elektrolytischen Vorgangs wird man auch die, an den einzelnen Elektroden aufsteigenden Gase auffangen und messen. Das an der Anode entweichende Sauerstoffgas kann zusammen mit dem von der Kathode stammenden Wasserstoff aufgesammelt und die Sauerstoffmenge nachträglich auf gasanalytische Methode bestimmt werden.

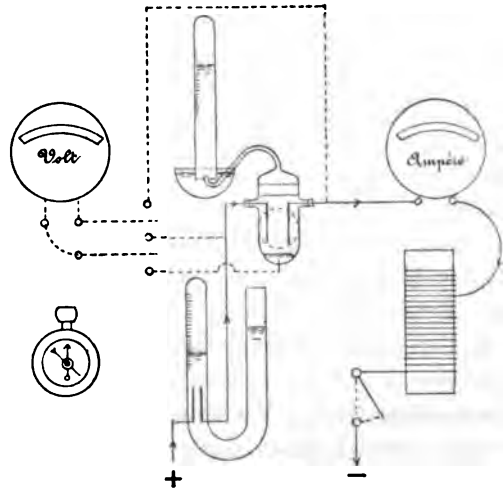
In Fig. 21 ist ein passendes Schema für die wissenschaftliche Untersuchung der Kochsalzelektrolyse (ohne Diaphragma) gegeben. Der Strom, dessen Richtung durch Pfeile angedeutet ist, tritt zuerst durch ein Knallgasvoltameter und darauf in den Zersetzer, um nach Passierung eines Strommessers und Regulierwiderstandes zur Quelle zurückzukehren. Wenn die Natur der Stromquelle vollkommen stationäre Spannung verbürgt (was bei einer nicht zu kleinen Akkumulatorbatterie zutreffen mag), kann das Knallgasvoltameter in Wegfall kommen, indem das zur Elektrolyse verwandte Stromquantum (Ampèresekunden) aus dem Produkt der abgelesenen Stromstärke mit der

Digitized by Google

Zeit sich ergibt. Aendert sich aber die Stromstärke während eines Versuchs, so ist es bequemer und genauer, aus dem Knallgasvolum das verwendete Stromquantum zu berechnen.

Die in Fig. 21 schematisierte Einrichtung dient auch dazu, über die elektrischen Grössen, welche bei dem Bleichflüssigkeitsprozess in Frage kommen, Aufschluss zu geben. Ausser den beiden, parallel einander gegenüberstehenden Platinelektroden befindet sich in dem, mit Gasableitungsrohr versehenen Zersetzer am Boden noch eine Hilfselektrode. Diese ist hier mit der aus dem Kalomelelement von Helmholtz bekannten Elektrode identisch und besteht aus mit Quecksilber-

Fig. 21.



chlorür überdecktem Quecksilber. Durch ein geeignetes Diaphragma (Fliesspapier, Asbestpappe oder dergl.), welches auf die Kalomelschichte gelegt wird, kann die Hilfselektrode dauernd fixiert werden.

Durch ein Voltmeter, dessen Widerstand den Dimensionen des Zersetzers entsprechen muss (ein vom Verfasser benütztes Präzisionsinstrument der European-Weston-Electrical-Instrument-Company hatte 1000 Ohm Widerstand und liess die Spannung bis auf $^1/_{100}$ Volt genau ablesen), werden die Potentialdifferenzen zwischen den Elektroden unter sich und gegenüber der Hilfselektrode, bei offenem und bei geschlossenem Stromkreis, gemessen. Ueber die Bedeutung der gemessenen Werte, die Methode des Messens selbst und die Verwertung derselben zur Interpretation der sich an den Elektroden abspielenden Vorgänge

Digitized by Google

kann hier nur auf eine frühere Publikation des Verfassers verwiesen werden [1]).

Das an der Anode gebildete Chlorpotential wird durch das Hinzutreten von alkalischer Salzlösung erniedrigt, und das der Kathode zukommende Natriumpotential wird ebenso durch das hinzutretende Wasser und die Chlorverbindungen herabgesetzt. Man hat es an jeder der Elektroden mit einer Summe von Vorgängen zu thun, aus welcher die Eliminierung der Einzelvorgänge bisher nicht gelungen ist. Bei der Diskussion der chemischen Vorgänge (S. 227) wurden einige Winke gegeben, welche auch für das Studium der elektrischen Grössen nützlich sein werden.

Die Elektrolyse der Kochsalzlösung ist kein reversibler Prozess und kann die Berechnung der Zersetzungsspannung aus der Wärmelösung hier keinen zutreffenden Wert liefern. — Die elektromotorische Kraft, welche der Zersetzung verdünnter (5%iger) Kochsalzlösungen zwischen blanken Platinelektroden bei der im technischen Betriebe üblichen Temperatur entgegensteht, ist aus anderen Gründen mit ca. 2,75 Volt zu bemessen. Bei Spannungen unterhalb dieser Grenze kann von einer Elektrolyse im praktischen Sinne des Wortes nicht gesprochen werden. Die elektromotorische Gegenkraft steigt mit sinkender Temperatur der Salzlösung. Wenn nun die sogenannte Joulesche Arbeit, derjenige Bruchteil der aufgewendeten elektrischen Arbeit, welcher nur zur Erwärmung der Flüssigkeit dient, auf Null gesetzt werden könnte, so würde die Arbeitsleistung von 2,7 Wattstunden 1,323 g Chlor in Freiheit setzen.

Um abermals auf die auf S. 213 angeführte Elektrolyse zurückzukommen, würde danach die theoretische Chlorausscheidung

$$\frac{112 \times 114 \times 3 \times 1{,}323}{2{,}7} = 18{,}73 \text{ kg}$$

betragen, also mehr als das Dreifache der wirklich erreichten Ausbeute.

Bei dem S-Elektrolyser, welcher per Kilogramm Chlor 4,5 Kilowattstunden absorbiert, erreicht der Nutzeffekt eine etwas acceptablere Grösse.

Nun liesse sich die gegenelektromotorische Kraft und damit die Klemmspannung dadurch herabsetzen, dass der Wasserstoff direkt an der Kathode verbrannt würde, oder dass dem sich dort abscheidenden Natrium Sauerstoff geboten würde. Das ist der Fall, wenn als Kathode

[1]) Siehe P. Schoop, Handbuch der elektrischen Akkumulatoren, S. 24 und folgende. Enke, Stuttgart 1898.

Digitized by Google

mit Kupferoxyd, Silberoxyd und ähnlichen Oxydationsmitteln bedeckte Elektroden verwendet werden. Das Kupferoxyd geht während der Elektrolyse in Schwammkupfer über, und es genügte, dieses kurze Zeit einem (warmen) Luftstrom auszusetzen, um dasselbe wieder in oxydiertes Kupfer (Kupferoxydul) zu regenerieren. — Mehr Aussicht auf praktischen Erfolg müsste ein Verfahren haben, bei welchem auf geeignete Weise der Luftsauerstoff direkt an die Kathode resp. in die betreffende Grenzschichte geführt werden könnte.

Digitized by Google

Ueber mehrphasige Stromsysteme bei ungleichmässiger Belastung.

Von

Wlad. Karapetoff.

Mit 65 Abbildungen.

Im vorliegenden Aufsatze werden einige Probleme über mehrphasige Wechselströme bei ungleichmässiger Belastung der Phasen behandelt. Die Absicht des Verfassers war dabei, mehr die allgemeinen Methoden zur Lösung solcher Probleme, als praktische Formeln für Berechnungen zu geben. Dementsprechend sind überall n-phasige Systeme mit ungleichen und unsymmetrischen Spannungen vorausgesetzt, und nur nachträglich die für dieselben giltigen allgemeinen Beziehungen zu gewöhnlichem Dreiphasensystem angewendet.

Für jede untersuchte Schaltung ist die analytische und die graphische Lösung gegeben; ausserdem, da wo die unmittelbare Lösung zu komplizierten Formeln führt, ist gezeigt, wie man die Aufgabe mittels allmählicher Annäherungen lösen kann.

Die Fälle mit und ohne Selbstinduktion sind getrennt behandelt, um zu zeigen, wie die Methoden sich dabei verallgemeinern.

Der Verfasser fühlt sich verpflichtet, an dieser Stelle seinem Kollegen, Herrn stud. electr. Ernst Rosenthal, für seine freundliche Hilfe in redaktioneller Hinsicht seinen Dank auszusprechen.

Erstes Kapitel.

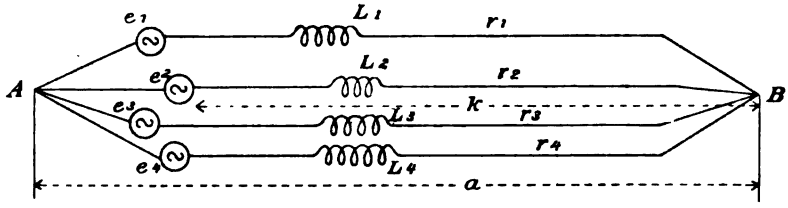
Sternschaltung.

Es sei ein mehrphasiges System in Sternschaltung gegeben (Fig. 1). Sämtliche Widerstände, Selbstinduktionskoëffizienten, Kapa-

Digitized by Google

zitäten seien der Grösse nach verschieden, alle aber gegebene Grössen. Die einzelnen EMK. seien nur einer Bedingung unterworfen: sie seien sinusförmig und haben dieselbe Frequenz. Im übrigen können sie

Fig. 1.

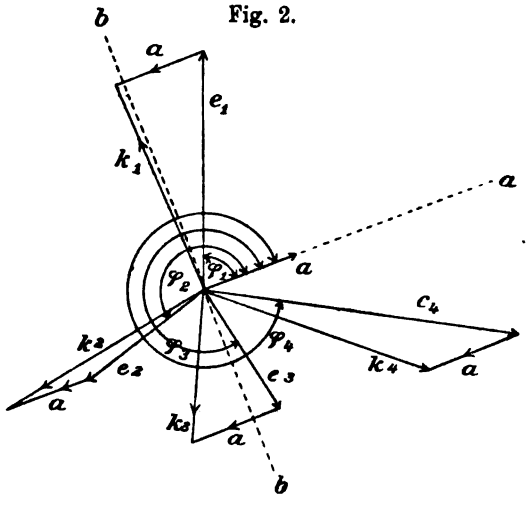


ganz beliebige Grössen und beliebige Phasenverschiebungen gegeneinander haben. Die Aufgabe ist, aus diesen gegebenen Grössen die Ströme und die Spannungen k (Fig. 1) zu finden.

1. Selbstinduktion ist nicht vorhanden.

Wir untersuchen zuerst den Fall ohne Selbstinduktion und Kapazität, d. h. sind nur Ohmsche Widerstände in allen Phasen vorhanden. Die Aufgabe der Bestimmung der Ströme kann auf diejenige der Be-

Fig. 2.



stimmung der Spannung zwischen den Punkten A und B (Fig. 1) zurückgeführt werden. Es sei a diese Spannung (Fig. 2) und φ_1 die Phasenverschiebung derselben gegen eine der gegebenen EMK., z. B.

Digitized by Google

gegen e_1, φ_2 gegen e_2 u. s. w. Ein Teil der EMK. e_1 hält Gleichgewicht der Spannung a, der übrige erzeugt den Strom i, folglich fliesst der Strom in der Phase 1 unter der Wirkung der Differenz von e_1 und a. Wir subtrahieren daher geometrisch den Vektor a vom Vektor e_1 und erhalten im Vektor k_1 die EMK., welcher der Strom i_1 in der Phase 1 entspricht. Diese EMK. hat dieselbe Phase wie der Strom i_1, da keine Selbstinduktion vorhanden ist; der Strom selbst ist $= \frac{k_1}{r_1}$. Ebenso finden wir die EMK. k_2, k_3 ... in den übrigen Phasen. Ist uns also die Spannung a der Grösse und der Richtung nach bekannt, so sind auch alle Ströme und deren Lagen im Vektordiagramm leicht zu finden. Deswegen wenden wir uns zu der Aufgabe, aus den bekannten Grössen e_1, e_2 ... r_1, r_2 ... die Spannung a nach Grösse und Richtung zu finden.

Die Summe aller Ströme ist für jeden Augenblick gleich Null, was aus dem ersten Kirchhoffschen Gesetze für die Punkte A und B folgt. Das Polygon der Vektoren dieser Ströme ist also ein geschlossenes, da die Summe der Projektionen dieser Vektoren auf jede beliebige Richtung gleich Null sein soll. Als diese beliebige Richtungen wollen wir die Richtung von a und die zu ihr senkrechte Richtung wählen. Diese letztere Richtung wollen wir mit b bezeichnen (Fig. 2) und schreiben zuerst die Summe der Projektionen von i auf b. Es ergibt sich

$$\Sigma\, i \cos(i, b) = \Sigma \frac{k}{r} \cos(k, b) = 0.$$

Da k die geometrische Differenz von e und a ist, so haben wir

$$k \cos(k, b) = e \cos(e, b) - a \cos(a, b).$$

Die Richtung b steht senkrecht zu a, folglich

$$e \cos(e, b) = e \sin(e, a) = e \sin \varphi;$$
$$\cos(a, b) = 0;$$

und wir bekommen einfach

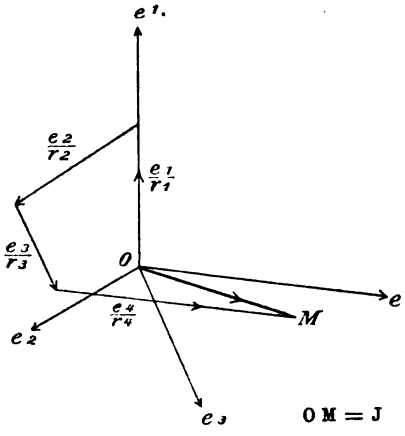
$$\Sigma \frac{e}{r} \sin \varphi = 0 \quad \ldots \ldots \ldots \quad (1)$$

Die Richtung der gesuchten Spannung a lässt sich aus dieser Gleichung leicht graphisch konstruieren. Die Gleichung (1) drückt aus, dass die Summe der Projektionen der fiktiven Ströme $\frac{e}{r}$ (die nicht

Digitized by Google

mit den wirklichen Strömen $\frac{k}{r}$ zu verwechseln sind) auf die zu a senkrechte Richtung gleich Null sein muss. Dabei ist aber die Summe der Projektionen dieser Ströme auf jede andere Richtung von Null verschieden (im Gegensatz zu den wirklichen Strömen $\frac{k}{r}$, die ein geschlossenes Polygon bilden). Daraus folgt die Konstruktion. Wir suchen die Resultante der fiktiven Ströme $\frac{e}{r}$, welche mit den Spannungen e dieselben Phasen haben; die Richtung dieser Resultante O M (Fig. 3) stellt uns die Richtung von a dar, weil die Projektion dieser Resultante nur auf die zu ihr selbst senkrechte Richtung gleich Null ist.

Fig. 3.



Um die Grösse des Vektors a zu bestimmen, projizieren wir die wirklichen Ströme $i = \frac{k}{r}$ auf die Richtung von a selbst; das ergibt

$$\Sigma \frac{k}{r} \cos (k, a) = 0.$$

Wieder haben wir

$$k \cos (k, a) = e \cos (e, a) - a \cos (a, a);$$
$$\cos (e, a) = \cos \varphi; \quad \cos (a, a) = 1,$$

folglich

$$\Sigma \frac{e \cos \varphi - a}{r} = 0,$$

woraus

$$\Sigma \frac{e}{r} \cos \varphi = a \Sigma \frac{1}{r} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (2)$$

Geometrisch betrachtet, stellt uns die linke Seite der Gleichung (2) die Summe der Projektionen der fiktiven Ströme $\frac{e}{r}$ auf die Richtung von a dar; diese Summe ist aber nichts anderes, als die Resultante O M = J (Fig. 3), welche uns vorher die Richtung von a bestimmt hat. Es genügt also, diese Resultante J, nach dem Massstabe der

Digitized by Google

Ströme gemessen, durch den Ausdruck $\Sigma \frac{1}{r}$ zu dividieren, um die Grösse der Spannung a zu finden.

Der Ausdruck $\Sigma \frac{1}{r}$ ist der reziproke Wert des Widerstandes des gesamten Systems zwischen den Punkten A und B. Wir setzen

$$\Sigma \frac{1}{r} = \frac{1}{R}$$

und können den obigen Satz folgendermassen ausdrücken:

Die gesuchte Spannung a ist gleich der geometrischen Resultante J der fiktiven Ströme $\frac{e}{r}$, multipliziert mit dem kombinierten Widerstande R der sämtlichen Leiter.

Das ganze Verfahren der Ermittelung der Spannung a ist also sehr einfach:

Man trägt auf den gegebenen Vektoren der Spannungen e die Ströme $\frac{e}{r}$ auf, und sucht die geometrische Resultante dieser Ströme. Die Richtung dieser Resultante ist die Richtung der Spannung a, und die Grösse dieser Resultante, mit dem kombinierten Widerstande R multipliziert, ist die Grösse der Spannung a selbst. Nachdem a gefunden ist, finden wir die in den einzelnen Leitern wirksamen Spannungen k als Differenzen der betreffenden e und a. Die Ströme i selbst sind $\frac{k}{r}$ gleich und fallen mit den Richtungen k zusammen.

Man kann auch die Richtung und Grösse von a kurzweg folgendermassen ableiten. Wir haben für jede Phase

$$\overline{k} = \overline{e} - \overline{a};$$

wo Striche über den Buchstaben geometrische Addition von Effektivwerten darstellen mögen; daraus folgt:

$$\frac{\overline{k}}{r} = \frac{\overline{e}}{r} - \frac{\overline{a}}{r} \quad \text{oder} \quad \overline{i} = \frac{\overline{e}}{r} - \frac{\overline{a}}{r}.$$

Die Summation über die sämtlichen Phasen ergibt:

$$\Sigma \overline{i} = \Sigma \frac{\overline{e}}{r} - \overline{a} \Sigma \frac{1}{r} = 0$$

oder

$$\overline{J} - \frac{\overline{a}}{R} = 0;$$

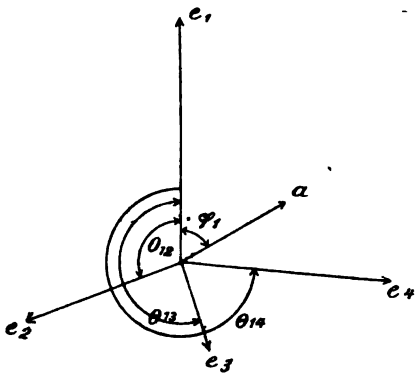
Digitized by Google

woraus

$$\bar{a} = R\,\bar{J},$$

d. h. wieder dasselbe Resultat. Ersetzen wir bei dieser Ableitung geometrische Addition durch algebraische, so bekommen wir die Beziehung $a = JR$ für Gleichstrom, d. h. für den Fall, dass die Spannungen e (Fig. 1) mittels Akkumulatoren, Gleichstrommaschinen etc. erzeugt werden.

Fig. 4.



Die Spannung a kann aus den Gleichungen (1) und (2) auch analytisch bestimmt werden; obwohl diese Gleichungen so viele unbekannte Winkel enthalten, als Phasen vorhanden sind, so lassen sich doch alle diese Unbekannten auf eine einzige, z. B. φ_1 zurückführen.

Es seien nämlich Θ_{12}, Θ_{13}, Θ_{14} ... (Fig. 4) die bekannten Winkel, welche die Vektoren e_2, e_3 ... mit dem Vektor e_1 bilden. Dann ist

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \Theta_{12}$$
$$\varphi_3 = \varphi_1 + \Theta_{13}$$
$$\ldots\ldots\ldots$$

und folglich

$$\Sigma \frac{e}{r} \sin\varphi = \frac{e_1}{r_1}\sin\varphi_1 + \frac{e_2}{r_2}\sin(\varphi_1 + \Theta_{12}) + \frac{e_3}{r_3}\sin(\varphi_1 + \Theta_{13}) + \ldots = 0$$

oder

$$\frac{e_1}{r_1}\sin\varphi_1 + \frac{e_2}{r_2}\sin\varphi_1\cos\Theta_{12} + \frac{e_2}{r_2}\cos\varphi_1\sin\Theta_{12} + \ldots = 0,$$

woraus

$$\operatorname{tg}\varphi_1 = -\frac{\frac{e_2}{r_2}\sin\Theta_{12} + \frac{e_3}{r_3}\sin\Theta_{13} + \ldots}{\frac{e_1}{r_1} + \frac{e_2}{r_2}\cos\Theta_{12} + \frac{e_3}{r_3}\cos\Theta_{13} + \ldots}$$

oder einfach

$$\operatorname{tg}\varphi_1 = -\frac{\Sigma\frac{e}{r}\sin\Theta}{\Sigma\frac{e}{r}\cos\Theta} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

Digitized by Google

Somit ist der Winkel φ_1 durch die bekannten Grössen ausgedrückt; die Gleichung (3) bestimmt die Lage von a.

Aehnlich haben wir aus der Gleichung (2):

$$a \Sigma \frac{1}{r} = \Sigma \frac{e}{r} \cos \varphi = \Sigma \frac{e}{r} \cos (\varphi_1 + \Theta)$$

$$= \cos \varphi_1 \Sigma \frac{e}{r} \cos \Theta - \sin \varphi_1 \Sigma \frac{e}{r} \sin \Theta;$$

$$a \Sigma \frac{1}{r} = \cos \varphi_1 \Sigma \frac{e}{r} \cos \Theta \cdot \left\{ 1 - \operatorname{tg} \varphi_1 \frac{\Sigma \frac{e}{r} \sin \Theta}{\Sigma \frac{e}{r} \cos \Theta} \right\}$$

oder mit Rücksicht auf (3)

$$\frac{a}{R} = \cos \varphi_1 \Sigma \frac{e}{r} \cos \Theta \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_1) = \frac{1}{\cos \varphi_1} \cdot \Sigma \frac{e}{r} \cos \Theta$$

Daraus ergibt sich

$$a = \frac{R}{\cos \varphi_1} \cdot \Sigma \frac{e}{r} \cos \Theta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Aus dieser Gleichung kann a berechnet werden, nachdem φ_1 aus der Gleichung (3) schon bekannt ist.

Aus der Gleichung (3) bekommen wir zwei Werte für φ_1, die sich um 180° voneinander unterscheiden. Derjenige von diesen beiden Werten ist der richtige, welcher einen positiven Wert für a in der Gleichung (4) ergibt. Behandeln wir das Problem graphisch, so kann keine Zweideutigkeit über φ_1 entstehen, da die Richtung von J auch diejenige von a ist.

Diese allgemeinen Betrachtungen wollen wir an zwei- und dreiphasigen Stromsystemen mit ungleichmässiger Belastung der Phasen anwenden; zuerst aber sagen wir einige Worte über die Rolle des Rückleiters, wie sich dieselbe auf Grund der entwickelten Betrachtungen ergibt. Diesen Rückleiter können wir uns als einen Leiter, in welchem die EMK. $e = 0$, vorstellen. Folglich bleiben alle vorigen Betrachtungen auch für diesen Fall giltig; die Resultante J der fiktiven Ströme bleibt dieselbe, ob ein Rückleiter existiert oder nicht, da für denselben $\frac{e}{r} = 0$ ist. Wenn wir aber durch Multiplizieren mit R von J zu a übergehen, müssen wir natürlich auch den Widerstand des Rückleiters im Ausdruck $\Sigma \frac{1}{r}$ in Betracht ziehen, so dass in diesem Falle a über-

Digitized by Google

haupt kleiner sein wird, als ohne Rückleiter. Folglich verkleinert die Einführung eines Rückleiters die Phasenverschiebungen zwischen e und k. In praktischen Fällen ist der Widerstand des Rückleiters sehr klein im Vergleich mit den Widerständen der Arbeitszweige mit Apparaten, so dass der kombinierte Widerstand R und somit auch die Spannungsdifferenz a in diesem Falle klein sind; die Ströme i bleiben mit ihren zugehörigen Spannungen beinahe in der Phase. Ist der

Fig. 5a.

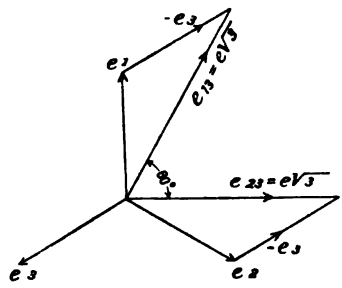
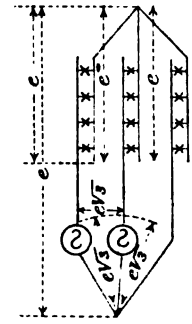


Fig. 5b.



Widerstand des Rückleiters gleich Null, so ist auch $a = 0$, und die sämtlichen Phasen arbeiten vollständig unabhängig voneinander. Bei kleinen Widerständen des Rückleiters ist das auch nahezu erfüllt.

Es sei noch darauf hingewiesen, dass jedes n-Phasensystem durch ein anderes ganz gleichwertiges System ersetzt werden kann, wenn alle EMK. um einen und denselben beliebigen Betrag b (geometrisch) geändert werden.

Um das zu beweisen, nehmen wir an, die Ströme i und die Spannung a haben dabei neue Werte i′ und a′ angenommen.

Wir haben:

$$\bar{i}' = \frac{\bar{e}' - \bar{a}'}{r} = \frac{\bar{e} - \bar{b} - \bar{a}'}{r}$$

und da

$$\Sigma \bar{i}' = 0 \quad \text{und} \quad \Sigma \frac{1}{r} = \frac{1}{R},$$

so erhält man nach der Summation:

$$\bar{a}' + \bar{b} = R \Sigma \frac{\bar{e}}{r}.$$

Aber

$$R \Sigma \frac{\bar{e}}{r} = R \bar{J} = \bar{a},$$

Digitized by Google

folglich

$$\overline{a'} + \overline{b} = \overline{a},$$

oder

$$\overline{a'} = \overline{a} - \overline{b}.$$

Setzen wir diesen Wert in den Ausdruck für $\overline{i'}$ ein, so bekommen wir

$$\overline{i'} = \frac{\overline{e} - \overline{b} - (\overline{a} - \overline{b})}{r} = \frac{\overline{e} - \overline{a}}{r}$$

oder

$$\overline{i'} = \overline{i},$$

d. h. durch die Aenderung der EMK. um einen und denselben Betrag werden die Ströme (und folglich auch die Spannungen k) nicht geändert. Die Spannung a ändert sich dabei um die Grösse b und kann durch die Wahl von b auf einen beliebigen Wert reduziert werden; wird z. B. $b = a$ gemacht, so ist $a' = 0$ und die Punkte A und B können beide geerdet werden.

Aus diesem Theorem geht unmittelbar hervor, dass jedes n-phasige System ohne Rückleiter durch ein gleichwertiges $(n-1)$-phasiges System mit n Leitern ersetzt werden kann. Dazu braucht man nur b gleich einer der Phasenspannungen zu wählen. Subtrahieren wir diese Grösse von allen Vektoren e, so wird eine der Spannungen gleich Null, die anderen nehmen neue Werte an. Haben wir z. B. ein gewöhnliches Dreiphasensystem (Fig. 5a), setzen $\overline{b} = \overline{e}_3$ und ziehen diesen Wert von e_1 und e_2 ab, so bekommen wir zwei Spannungen e_{13} und e_{23}, die um 60° gegeneinander verschoben sind. Die neue Schaltung ist in Fig. 5b dargestellt; sämtliche Spannungen sind dort angedeutet. Die Lampen brennen unter derselben Spannung e wie früher. Wenn man sogar während des Betriebes zu allen Spannungen mittels entsprechender Vorrichtungen eine und dieselbe Spannung hinzuaddiert, wird das auf das Brennen keinen Einfluss haben.

Man kann sich die Sache klarer machen, wenn man sich die entsprechende Schaltung für Gleichstrom denkt.

Bei der Schaltung Fig. 5b hat die Maschine nur zwei anstatt drei Ankerwickelungen, die um 60° gegeneinander verschobene EMK. $e\sqrt{3}$ geben[1]). Dabei liefert die Maschine einen gewöhnlichen Drehstrom;

[1]) Diese Schaltung kann man mit jeder gewöhnlichen Drehstrommaschine ausführen. Man schaltet dazu eine Phasenwickelung ganz aus, tauscht die Enden der zweiten Phase um, und bekommt aus der zweiten und dritten Phase zwei um 60° elektrodynamisch gegeneinander verschobene Wickelungen. Bei der nor-

Digitized by Google

bei ungleichmässiger Belastung gibt sie auch dieselben Ströme und Spannungen wie eine gewöhnliche Drehstrommaschine unter gleichen Verhältnissen. Nur kann man einen Rückleiter nicht anbringen, da man dabei die Phase 3 einfach kurzschliesst.

Ist in einem n-phasigen System ein Rückleiter schon vorhanden, so kann man in denselben eine beliebige EMK. einschalten, alle EMK. um denselben Betrag ändern und dadurch ein $(n+1)$-Phasensystem mit denselben i und k, aber ohne Rückleiter bekommen.

Aus diesen Betrachtungen geht hervor, dass man dieselben Ströme und dieselben wirksamen Spannungen k in einem gegebenen Leitersystem mittels einer unendlich grossen Zahl von Kombinationen der Spannungen e erreichen kann. Das Theorem, dass i und k sich nicht ändern, wenn die sämtlichen e um einen und denselben Vektor geändert werden, gilt auch für den Fall, dass Selbstinduktion und Kapazität vorhanden sind. Der Beweis ist dem vorigen ganz analog, wenn man die weiter angegebene Methode der Berücksichtigung von Phasenverschiebungen in Betracht zieht.

Beispiel 1. Den Ausdruck (3) für den Fall eines gewöhnlichen Dreiphasensystems anzuwenden. Hier ist

$$e_1 = e_2 = e_3$$

$$\Theta_{12} = 120^0;\ \sin\Theta_{12} = \frac{\sqrt{3}}{2};\ \cos\Theta_{12} = -\frac{1}{2}$$

$$\Theta_{13} = 240^0;\ \sin\Theta_{13} = -\frac{\sqrt{3}}{2};\ \cos\Theta_{13} = -\frac{1}{2}.$$

Folglich

$$\operatorname{tg}\varphi_1 = -\frac{\sqrt{3}\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3}\right)}{\frac{2}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3}};$$

ist $r_2 = r_3$, so ist $\varphi_1 = 0$ oder $\varphi_1 = 180^0$, je nachdem $r_1 \lesseqgtr r_2$ (siehe die Beispiele 2 und 3, bezw. Fig. 6 und 7).

---

malen Erregung wird jetzt die Spannung an den Klemmen der Lampen $\sqrt{3}$mal kleiner, als vorhin.

Diese Schaltung hat nur ein theoretisches Interesse: durch den Spannungsabfall in der Maschine selbst ändert sich die Phasenverschiebung 60° mit der Belastung, so dass eine Unsymmetrie sogar bei gleichmässiger Belastung eintritt; Kupferaufwand würde in dieser Maschine auch nicht kleiner, als in der gewöhnlichen sein; es ist unmöglich, eventuell einen Rückleiter anzuwenden, und einer der Sternpunkte muss unbedingt von der Erde isoliert sein.

Digitized by Google

Beispiel 2. Eine Phase eines Dreiphasensystems sei mehr als die beiden anderen belastet ($r_1 < r_2 = r_3$), und zwar brennen in dieser Phase um 30 % mehr Lampen, als in jenen; ein Rückleiter sei nicht vorhanden. Die Ströme, Spannungen und Phasenverschiebungen sind zu finden. Wir behandeln die Aufgabe graphisch. Es seien $e = 100$ V, $r_2 = r_3 = 10\,\Omega$ (20 Lampen à $200\,\Omega$), $r_1 = 7{,}7\,\Omega$ (26 Lampen à $200\,\Omega$). Zuerst suchen wir die Resultante J der fiktiven Ströme (Fig. 6). In unserem Falle ist

$$\frac{e_1}{r_1} = 13\text{ A},\quad \frac{e_2}{r_2} = \frac{e_3}{r_3} = 10\text{ A},$$

woraus wir graphisch finden

$$J = 3\text{ A}.$$

Den kombinierten Widerstand R finden wir aus der Formel

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{10} + \frac{1}{10} + \frac{1}{77} = \frac{1}{3{,}03},$$

woraus

$$a = 3 \times 3{,}03 = 9{,}09\text{ V}.$$

Wir ziehen a graphisch von den Vektoren e ab und bekommen

$$k_1 = 91\text{ V};\ i_1 = \frac{91}{7{,}7} = 11{,}8\text{ A};\ k_2 = k_3 = 105\text{ V};$$

$$i_2 = i_3 = \frac{105}{10} = 10{,}5\text{ A}.$$

Bei gleichmässiger Belastung verbraucht jede Lampe $\frac{100^2}{200} = 50$ Watt, jetzt aber in der Phase 1 nur $\frac{91^2}{200} = 41{,}5$ Watt, in den beiden anderen Phasen dagegen $\frac{105^2}{200} = 55$ Watt.

Wir sehen, dass ein richtiges Brennen unmöglich ist und auch durch Regulieren der Maschine nicht erreicht werden kann. Ein Rückleiter ist hier unentbehrlich. Die Spannung a fällt hier in die Richtung von e_1 und $\varphi_1 = 0$. Wäre $r_1 > r_2 = r_3$, so wäre $\varphi_1 = 180^0$ (siehe nächstes Beispiel).

Es ist noch interessant zu bemerken, dass, während die Phasenspannungen k an den Lampen verschieden sind (Fig. 6), alle verketteten Spannungen einander gleich sind, wie im Falle einer gleichmässigen Belastung, da das Dreieck, welches die Enden der Vektoren k verbindet, ein gleichseitiges ist. Folglich, nur die Phasenspannungen in

Digitized by Google

Bezug auf den Punkt B (Fig. 1) sind in diesem Falle massgebend für das Brennen der Lampen.

Beispiel 3. Wir nehmen jetzt an, die Phasen 2 und 3 seien

Fig. 6.

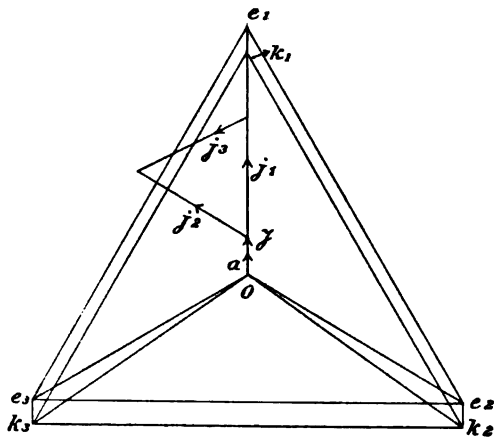
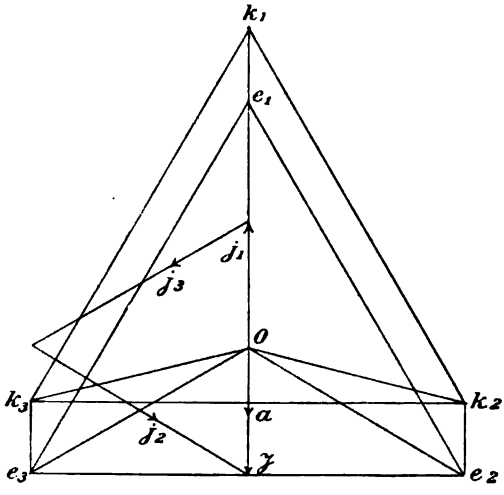


Fig. 7.



um 30 % mehr als die Phase 1 belastet. Aehnlich wie früher finden wir (Fig. 7):

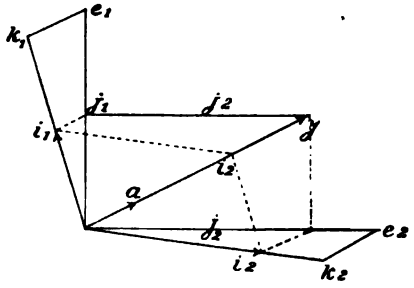
$$J = 10\,A;\quad R = 2{,}78\,\Omega;\quad a = 27{,}8\,V;\quad k_1 = 128\,V;$$
$$k_2 = k_3 = 90\,V;\quad \varphi_1 = 180^0.$$

Digitized by Google

Das Brennen der Lampen ist in diesem Falle wiederum praktisch unmöglich, und doch sind die Netzspannungen wie früher alle = 100 V geblieben.

Beispiel 4. Anwendung der Methode auf Zweiphasensysteme. Ein zweiphasiges System kann natürlich nur mit einem Rückleiter realisiert werden, denn sonst kombinieren sich die beiden Phasenspannungen und bilden einen gewöhnlichen Wechselstrom. Wir haben also zwei Fälle zu untersuchen, je nachdem der Widerstand des Rückleiters vernachlässigt werden kann oder nicht. Im ersten Falle ist immer R = 0 und a = 0; die beiden Phasen arbeiten unabhängig voneinander, die Ströme haben dieselben Phasen wie die Spannungen e, der Strom im Rückleiter ist

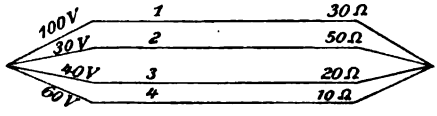
Fig. 8.



$$i_r = \sqrt{i_1^2 + i_2^2}.$$

Im Falle $i_1 = i_2 = i$, $i_r = i\sqrt{2}$ und dementsprechend muss der Rückleiter bei derselben Stromdichte einen $\sqrt{2}$ mal so grossen Querschnitt haben, wie die Phasenleitungen. Hat der Rückleiter einen merklichen Widerstand, so ist der Phasenwinkel zwischen i_1 und i_2 grösser als 90° (Fig. 8); die Konstruktion der Stromvektoren ist aus der Figur ersichtlich. Der Rückstrom ist selbstverständlich mit der Spannung a in gleicher Phase, da der Rückleiter keine Selbstinduktion besitzt. Das bietet eine Kontrolle für die Konstruktion.

Fig. 9.



Beispiel 5. Anwendung der Methode auf einen allgemeinen Fall. Es sei ein vierphasiger Stromkreis mit Phasenspannungen 100V, 30V, 40V und 60V und mit Widerständen der einzelnen Zweige = 30Ω, 50Ω, 20Ω, 10Ω gegeben (Fig. 9 und 10). Die Ströme und Spannungen in den einzelnen Leitern sind zu finden. Wir tragen zuerst auf den gegebenen Vektoren e_1, e_2 ... die fiktiven Ströme $j_1 = \frac{100}{30}$; $j_2 = \frac{30}{50}$

Digitized by Google

u. s. w. auf. Die geometrische Resultante dieser Ströme J = 6,75 A (Fig. 10); der kombinierte Widerstand

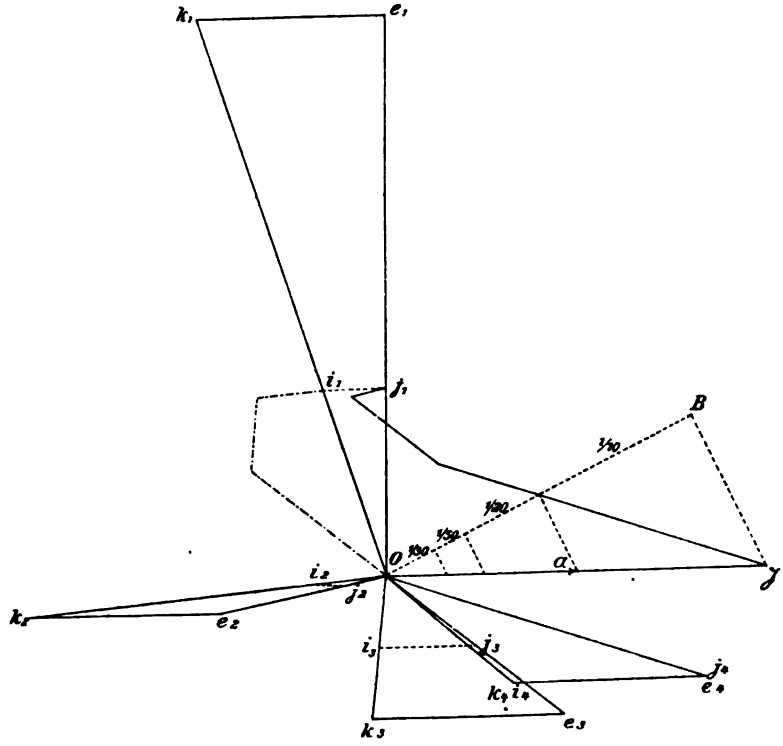
$$R = \frac{1}{\frac{1}{30} + \frac{1}{50} + \frac{1}{20} + \frac{1}{10}} = 4{,}92\ \Omega,$$

folglich

$$a = 4{,}92 \times 6{,}75 = 33{,}2\ V.$$

Ziehen wir diese Spannung a von den gegebenen EMK. geometrisch ab, so bekommen wir die Richtungen und die Grössen der

Fig. 10.



wahren Spannungen k. Die Ströme j, im Verhältnisse der betreffenden $\frac{k}{e}$ reduziert, geben uns die wirklichen Ströme i, die mit den Spannungen k in der gleichen Phase sind. Auf dem Diagramm ist mit strichpunktierten Linien gezeigt, dass diese Ströme ein geschlossenes Vieleck bilden. Das ist eine Kontrolle für die ganze Konstruktion.

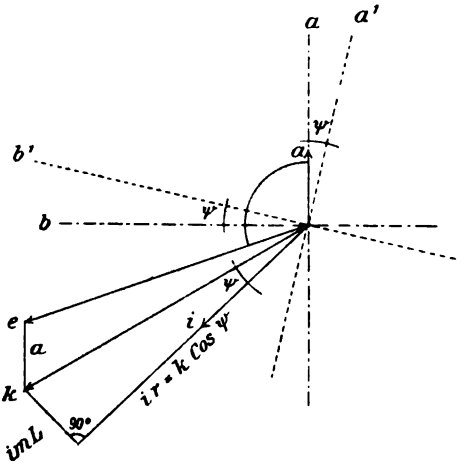
Digitized by Google

Man könnte auch anders vorgehen: die Strecken $i_1 j_1$, $i_2 j_2 \ldots$, welche die Enden der Vektoren j und i miteinander verbinden, sind alle der Richtung J parallel: ihre Grössen sind $\frac{a}{r_1}, \frac{a}{r_2} \ldots$, und ihre Summe ist gleich J. Folglich, wenn wir den Vektor J in vier Teile, die sich wie $\frac{1}{r_1} : \frac{1}{r_2} : \ldots = \frac{1}{30} : \frac{1}{50} : \ldots$ verhalten (Hilfsgerade O B in Fig. 10) teilen, so sind diese Teile den Strecken $j_1 i_1$, $j_2 i_2 \ldots$ gleich, und es genügt, diese Längen von den Enden der Vektoren j aufzutragen, um die Endpunkte von i zu finden. Die Spannung a brauchen wir dabei nicht zu wissen, bekommen aber die Spannungen k auch nicht.

2. Selbstinduktion oder Kapazität ist vorhanden.

Wir suchen, wie im vorigen Falle, den Vektor der unbekannten Spannung a zwischen den beiden Sternpunkten. Ist derselbe gefunden, so ziehen wir ihn von den Vektoren e geometrisch ab und bekommen somit die in den einzelnen Leitern wirksamen Spannungen k. Da nach der Voraussetzung alle Widerstände, Selbstinduktionskoëffizienten etc.

Fig. 11.



gegeben sind, so sind auch die Phasenverschiebungen in den einzelnen Leitern bekannt. Folglich finden wir leicht aus den Grössen k die Ströme i, da dieselben um die Winkel $\psi = \text{arctg} \frac{mL}{r}$ gegen die Vektoren k verschoben und gleich $\frac{k \cos \psi}{r}$ sind (Fig. 11).

Digitized by Google

Die Ableitung der Formeln für a ist ganz ähnlich, wie im vorigen Falle. Es besteht wieder die Beziehung, dass das Vieleck der wirklichen Ströme ein geschlossenes ist, d. h. die Summe der Projektionen dieser Ströme sowohl auf die Richtung a, wie auf die zu ihr senkrechte Richtung b = 0 ist.

Also

$$\Sigma\, i \cos(i, a) = 0 \quad \text{und} \quad \Sigma\, i \cos(i, b) = 0,$$

wo

$$i = \frac{k \cos \psi}{r};$$

folglich

$$\Sigma \frac{\cos \psi}{r} k \cos(i, a) = 0 \quad \text{und} \quad \Sigma \frac{\cos \psi}{r} k \cos(i, b) = 0.$$

Da k die geometrische Differenz von e und a ist, so haben wir für zwei ganz beliebige Richtungen a′ und b′ (Fig. 11)

$$k \cos(k, a') = e \cos(e, a') - a \cos(a, a'),$$
$$k \cos(k, b') = e \cos(e, b') - a \cos(a, b').$$

Wenn die Richtungen a′ und b′ so gewählt sind, dass sie die Winkel ψ mit den Richtungen a und b bilden, so haben wir:

$$k \cos(k, a') = k \cos(i, a) = e \cos(\varphi + \psi) - a \cos \psi$$

und analog

$$k \cos(k, b') = k \cos(i, b) = e \sin(\varphi + \psi) - a \sin \psi.$$

Setzen wir diese Ausdrücke für k cos (i, a) und k cos (i, b) in die obigen Gleichungen ein, so bekommen wir:

$$\Sigma \frac{\cos \psi}{r} [e \cos(\varphi + \psi) - a \cos \psi] = 0$$

$$\Sigma \frac{\cos \psi}{r} [e \sin(\varphi + \psi) - a \sin \varphi] = 0,$$

woraus folgt:

$$\Sigma \frac{e \cos \psi}{r} \cos(\varphi + \psi) = a \Sigma \frac{\cos^2 \psi}{r} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

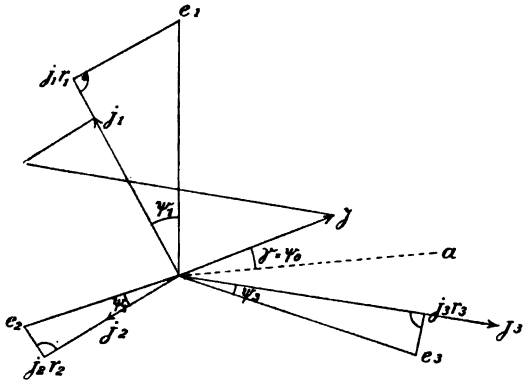
$$\Sigma \frac{e \cos \psi}{r} \sin(\varphi + \psi) = a \Sigma \frac{\sin \psi \cos \varphi}{r} \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Diese Gleichungen entsprechen den Gleichungen (1) und (2) für den Fall ohne Selbstinduktion und nehmen deren Gestalt an, wenn wir sämtliche $\psi = 0$ setzen. Die Unbekannten φ und a können aus diesen Gleichungen sowohl analytisch als graphisch bestimmt werden.

Digitized by Google

Zuerst geben wir die graphische Lösung. Die linke Seite dieser Gleichungen stellt die Summe der Projektionen der Vektoren $\frac{e \cos \psi}{r}$ auf zwei zu einander senkrechte Richtungen a und b dar. Diese Vektoren $\frac{e \cos \psi}{r} = j$ wollen wir entsprechend der früheren Bezeichnung fiktive Ströme nennen, da $\frac{r}{\cos \psi}$ die scheinbaren Widerstände der einzelnen Leiter sind. Die Gleichungen (5) und (6) zeigen, dass j gegen die Vektoren e um die Winkel ψ verschoben sind: [sin $(\varphi + \psi)$,

Fig. 12.



$\cos (\varphi + \psi)$]. Konstruieren wir die Resultante dieser fiktiven Ströme und bezeichnen dieselbe mit J, so bekommen wir

$$J \cos \gamma = a \Sigma \frac{\cos^2 \psi}{r} \quad \text{und} \quad J \sin \gamma = a \Sigma \frac{\sin \psi \,.\, \cos \psi}{r},$$

wo γ der unbekannte Winkel ist, welchen diese Resultante mit der Richtung von a bildet (Fig. 12). Um jetzt a und γ zu bestimmen, müssen wir auch die auf der rechten Seite dieser Gleichungen stehenden Summen durch ihre Resultanten ersetzen. Dazu bezeichnen wir die scheinbaren Widerstände oder die Impedanzen $\frac{r}{\cos \psi}$ der einzelnen Phasen mit v, so dass

$$v = \frac{r}{\cos \psi},$$

folglich

$$\Sigma \frac{\cos^2 \psi}{r} = \Sigma \frac{\cos \psi}{v} \quad \text{und} \quad \Sigma \frac{\sin \psi \cos \psi}{r} = \Sigma \frac{\sin \psi}{v}.$$

Digitized by Google

Jetzt setzen wir

$$\Sigma \frac{\cos \psi}{v} = \frac{\cos \psi_0}{V} \quad \text{und} \quad \Sigma \frac{\sin \psi}{v} = \frac{\sin \psi_0}{V},$$

so dass

$$J \cos \gamma = a \frac{\cos \psi_0}{V} \quad \text{und} \quad J \sin \gamma = a \frac{\sin \psi_0}{V}.$$

Aus diesen Gleichungen folgt unmittelbar

$$a = J V \quad \text{und} \quad \gamma = \psi_0 \ldots \ldots \ldots \quad (7)$$

Es lässt sich zeigen, dass V die äquivalente Impedanz sämtlicher Leiter und ψ_0 der entsprechende Phasenverschiebungswinkel ist. Zu diesem Zwecke denken wir uns einen gewöhnlichen Wechselstromkreis (Fig. 13), welcher an einer Stelle aus mehreren parallel geschalteten

Fig. 13.

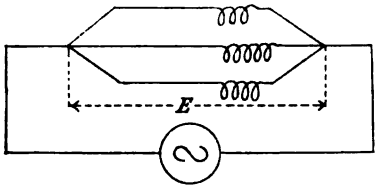
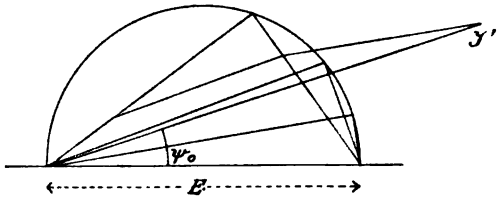


Fig. 14.



Leitern besteht; man soll den Ausdruck für den äquivalenten Widerstand und die äquivalente Phasenverschiebung dieser Leiter finden.

Wir konstruieren nach der bekannten Regel [1]) die Ströme i′ in den einzelnen Zweigen (Fig. 14), dann den resultierenden Strom J′ und bekommen

$$J' \cos \psi_0 = \Sigma\, i' \cos \psi \quad \text{und} \quad J' \sin \psi_0 = \Sigma\, i' \sin \psi.$$

Die Amplitude jedes Stromes ist gleich derjenigen der Spannung E, dividiert durch den scheinbaren Widerstand, d. h.

$$i' = \frac{E}{v} \quad \text{und} \quad J' = \frac{E}{V},$$

und da E (Fig. 13) für sämtliche Zweige dasselbe ist, so haben wir, wenn wir die Werte von i′ und J′ in die obigen Gleichungen einsetzen:

$$\Sigma \frac{\cos \psi}{v} = \frac{\cos \psi_0}{V} \quad \text{und} \quad \Sigma \frac{\sin \psi}{v} = \frac{\sin \psi_0}{V} \ldots \quad (8)$$

[1]) Die einfachsten Konstruktionen für einphasigen Wechselstrom müssen wir als bekannt voraussetzen.

Digitized by Google

Die Gleichungen (8) drücken folgenden Satz aus: Der reziproke Wert der äquivalenten Impedanz parallel geschalteter Zweige ist gleich der geometrischen Summe der reziproken Werte der Impedanzen einzelner Zweige [1]) (Fig. 15). Dieser Satz entspricht dem Satze $\frac{1}{R} = \Sigma \frac{1}{r}$ für den Fall ohne Selbstinduktion. Wie man aus der Fig. 15 sieht, sind die einzelnen Werte $\frac{1}{v}$ unter den entsprechenden Winkeln ψ aufzutragen. Die Schlusslinie gibt die Grösse $\frac{1}{V}$ und gleichzeitig den Winkel ψ_0.

Nachdem wir die Bedeutung und die Konstruktion von V und ψ_0 gezeigt haben, können wir mit Rücksicht auf die Gleichungen (7) folgen-

Fig. 15.

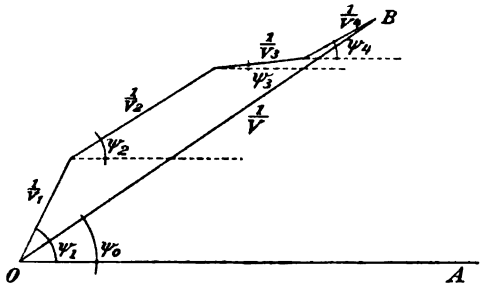
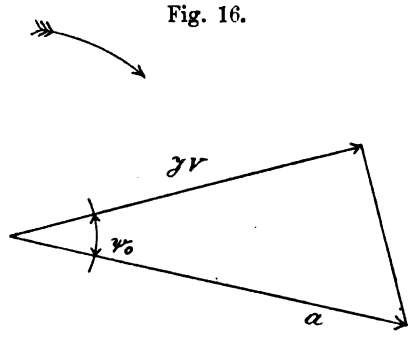


Fig. 16.



den Satz aussprechen: Die Spannung a ist gleich der Resultante J der fiktiven Ströme, multipliziert mit dem äquivalenten scheinbaren Widerstande V sämtlicher Leiter, und eilt dieser Resultante um den äquivalenten Phasenverschiebungswinkel ψ_0 voraus [2]) (Fig. 16). Man sieht leicht die Analogie mit dem Falle ohne Selbstinduktion: dort tritt der äquivalente (kombinierte) Ohmsche Widerstand ein und a fällt in die Richtung von J, da $\psi_0 = 0$.

Wir fassen den Gang der Konstruktion noch einmal kurz zusammen.

---

[1]) Den reziproken Wert der Impedanz hat Steinmetz Admittanz genannt; der obige Satz lautet also: die äquivalente Admittanz ist gleich der geometrischen Summe der Admittanzen einzelner Zweige.

[2]) Im zweiten Kapitel ist eine einfachere Ableitung dieses Satzes gegeben (S. 279). Wir haben vorgezogen, das Theorem, auf welchem diese Ableitung beruht, nur im zweiten Kapitel abzuleiten.

Digitized by Google

Es sind die Phasenspannungen und die Konstanten der Leitungen gegeben. Die Ströme sind zu finden. Zuerst tragen wir die fiktiven Ströme $j = \frac{e \cos \psi}{r} = \frac{e}{v}$ auf; dieselben sind um die Winkel ψ gegen die Spannungen e im Sinne der Nacheilung verschoben. Dann konstruieren wir die Resultante J dieser Ströme. Unabhängig von dieser Konstruktion wird in der früher beschriebenen Weise (Fig. 15) der äquivalente scheinbare Widerstand V und die Phasenverschiebung ψ_0 gefunden; die Spannung a ist gleich J V und eilt dem Vektor J um den Winkel ψ_0 voraus.

Ist die Spannung a gefunden, so findet man nach der Fig. 11 die Spannungen k und dann die wirklichen Phasenströme i.

Es ist selbstverständlich, dass diese Konstruktion ihre Giltigkeit bewahrt, wenn anstatt Selbstinduktion Kapazität vorhanden ist. Der allgemeinen Theorie der Wechselströme gemäss ist die Induktanz $m L = -\frac{1}{m C}$ zu setzen, wo C Kapazität ist, und die entsprechenden Phasenverschiebungswinkel sind negativ zu nehmen.

Jetzt geben wir die analytische Lösung der Gleichungen (5) und (6), die vielleicht auch in manchen Fällen wünschenswert sein kann. Wir ersetzen, wie früher, die Winkel φ durch die Winkel Θ (Fig. 4) und bekommen somit

$$\Sigma \frac{e \cos \psi}{r} \cos (\varphi_1 + \Theta + \psi) = a \Sigma \frac{\cos^2 \psi}{r},$$

$$\Sigma \frac{e \cos \psi}{r} \sin (\varphi_1 + \Theta + \psi) = a \Sigma \frac{\cos \psi \sin \psi}{r}.$$

Wegen Abkürzung bezeichnen wir

$$j = \frac{e \cos \psi}{r}; \quad \Sigma j \sin (\Theta + \psi) = A; \quad \Sigma j \cos (\Theta + \psi) = B;$$

$$\Sigma \frac{\sin \psi \cos \psi}{r} = M; \quad \Sigma \frac{\cos^2 \varphi}{r} = N$$

und bekommen

$$\begin{cases} B \cos \varphi_1 - A \sin \varphi_1 = a N, \\ B \sin \varphi_1 + A \cos \varphi_1 = a M. \end{cases}$$

In diesen Gleichungen sind nur a und φ_1 unbekannt und können daraus bestimmt werden. Die physikalische Bedeutung einzelner Koëffizienten wurde schon bei der graphischen Lösung angegeben.

Wir erhöhen die beiden Gleichungen ins Quadrat, addieren dieselben und bekommen

$$a^2 (M^2 + N^2) = A^2 + B^2$$

Digitized by Google

oder

$$a = \sqrt{\frac{A^2 + B^2}{M^2 + N^2}}.$$

Die erste Gleichung, durch die zweite dividiert, gibt

$$\frac{B - A \operatorname{tg} \varphi_1}{B \operatorname{tg} \varphi_1 + A} = \frac{N}{M},$$

woraus

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{BM - AN}{AM + BN} \quad \ldots \ldots \quad (9)$$

Den Ausdrücken für a und tg φ_1 kann man eine für die Berechnungen bequemere Form geben. Wir setzen

$$\frac{B}{A} = \operatorname{tg} y \quad \text{und} \quad \frac{N}{M} = \operatorname{tg} z$$

und bekommen

$$a = \frac{A}{M} \cdot \frac{\cos z}{\cos y}; \quad \operatorname{tg} \varphi_1 = \operatorname{tg} (y - z) \quad \ldots \quad (10)$$

Man sieht leicht, dass, wenn alle $\psi = 0$ sind, der Ausdruck (9) mit (3) übereinstimmt.

Bei der Anwendung der Formel (10) ist die positive Richtung für den Winkel φ_1 dieselbe, in welcher die Winkel Θ als positiv angenommen wurden, so dass z. B. der Winkel φ_1 in Fig. 2 einen negativen Wert hat, da wir dort Θ in der dem Uhrzeiger entgegengesetzten Richtung als positiv angenommen haben.

Aus den Gleichungen (10) bekommt man zwei Werte für φ_1, die um 180° voneinander verschieden sind. Um zu entscheiden, welcher Wert der richtige ist, bilden wir aus der Gleichung

$$B \cos \varphi_1 - A \sin \varphi_1 = a N$$

den Ausdruck

$$\frac{A}{\cos y} \cos (\varphi_1 + y) = a N.$$

Die rechte Seite dieses Ausdruckes ist immer positiv, folglich, wenn $A > 0$ ist, müssen cos y und cos $(\varphi_1 + y)$ dasselbe Vorzeichen haben, wenn aber $A < 0$, müssen die Vorzeichen der beiden cos verschieden sein. Es sei z. B. tg $\varphi_1 = 0{,}649$ und tg $y = 0{,}105$; zu entscheiden ist, ob für φ_1 der Wert $\varphi_1 =$ arctg $0{,}649 = 33°$, oder $33° + 180° = 213°$ angenommen werden muss; der Winkel $y =$ arctg $0{,}105 = 6°$; $y + \varphi_1 = 33° + 6° = 39°$ oder $213° + 6° = 219°$; da in unserem Falle cos y positiv ist, so muss bei $A > 0$, $\varphi_1 = 33°$

Digitized by Google

genommen werden, da $\cos(33^0 + 6^0) > 0$; ist A negativ, so muss $\varphi_1 = 213^0$ genommen werden. Die Frage ist leicht zu entscheiden, da A schon vorher berechnet werden muss. Man kann dabei leicht zeigen, dass es ganz gleichgiltig ist, ob wir $y = 6^0$ oder $y = 180^0 + 6^0 = 186^0$ nehmen.

Beispiel. Es seien in einem vierphasigen System (Fig. 17) gegeben: die EMK.

$$e = 100,\ 30,\ 40,\ 60 \text{ Volt},$$

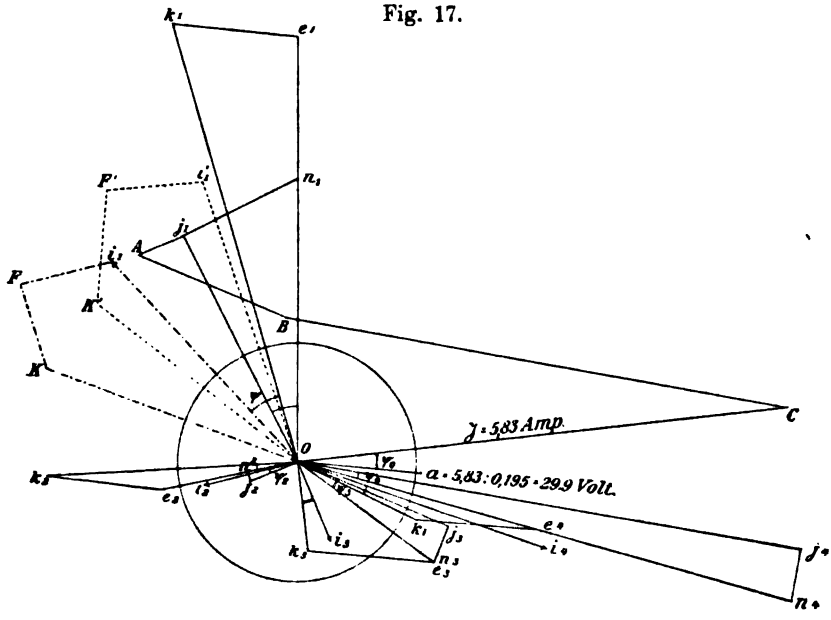
die entsprechenden Widerstände und die Induktanzen

$$r = 30,\ 50,\ 20,\ 10 \text{ Ohm},$$
$$mL = 15,\ 10,\ 5,\ 1 \text{ Ohm};$$

die Ströme in einzelnen Phasen sind graphisch zu finden.

Zuerst konstruieren wir die Winkel ψ (Fig. 18), indem wir auf einer Geraden MN die Widerstände $r = M1, M2 \ldots$ und auf den Senk-

Fig. 17.



rechten zu derselben die Induktanzen $mL = 1\,1', 2\,2' \ldots$ auftragen und die Strahlen $M1', M2' \ldots$ ziehen. In Fig. 17 ziehen wir die Strahlen Oj_1, $Oj_2 \ldots$ um die Winkel ψ gegen die EMK. e nacheilend. Um die Grössen j zu finden, tragen wir auf den Vektoren e im Massstabe der Ströme die Strecken $\frac{e}{r}$ auf und bekommen die Punkte $n_1, n_2 \ldots$

Digitized by Google

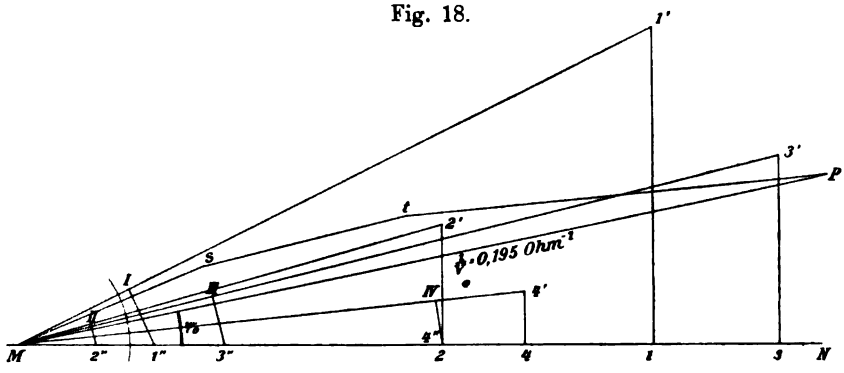
Die Projektionen dieser Strecken auf die Strahlen O j sind gleich den fiktiven Strömen j, da

$$O\,j = \overline{O\,n} \,.\, \cos\psi = \frac{e}{r}\cos\psi = \frac{e}{v} = j.$$

Das Polygon $O\,j_1\,A\,B\,C$ ist die geometrische Summe der Vektoren j und die Schlusslinie O C stellt die Resultante J dar.

Jetzt konstruieren wir (Fig. 18) die Impedanz V. Auf der Geraden M N tragen wir die Grössen $\frac{1}{r} = M\,1''$, $M\,2'' \ldots$ und fällen die Lote $1''\,I$, $2''\,II \ldots$ auf die vorher gefundenen Strahlen $M\,1'$, $M\,2' \ldots$

Fig. 18.



Die Längen M I, M II ... sind gleich den reziproken Werten der Impedanzen; deren geometrische Resultante ist $M\,P = \frac{1}{V}$ und $\sphericalangle\, P\,M\,N = \psi_0$. Die Resultante J, mit der Impedanz V multipliziert, gibt den Vektor a, den wir um den Winkel ψ_0 gegen J verschoben in Fig. 17 auftragen. Ziehen wir jetzt den Vektor a von den Vektoren e geometrisch ab, so bekommen wir die Vektoren k der wirklichen Phasenspannungen, und um die Winkel ψ gegen dieselben verschoben die Ströme i.

Für eine einfache Konstruktion derselben bemerke man, dass

$$\frac{j}{i} = \frac{e}{k}$$

und die Dreiecke O e k und O j i einander ähnlich sind.

Die Ströme i sind zur Kontrolle auch in der Form des Vierecks $O\,i_1\,F\,K$ dargestellt, um zu zeigen, dass ihre Summe wirklich gleich Null ist. Das punktierte Viereck $O\,i'_1\,F'\,K'$ ist der Fig. 9 ent-

Digitized by Google

nommen und stellt die Ströme i für den Fall ohne Selbstinduktion bei denselben Widerständen und EMK. dar. Man sieht, welche Aenderungen in der Grösse und Lage der Stromvektoren die Selbstinduktion hervorgerufen hat.

Zweites Kapitel.

Stromverbrauchende Apparate in Netzschaltung.

1. Selbstinduktion ist nicht vorhanden.

Es sei A (Fig. 19) der Knotenpunkt der Leiter A a, A b, A c . . ., in welche beliebige sinusförmige EMK. e_1, e_2 . . . eingeschaltet sind; a b c d e a sei ein Netz mit stromverbrauchenden Apparaten.

Fig. 19.

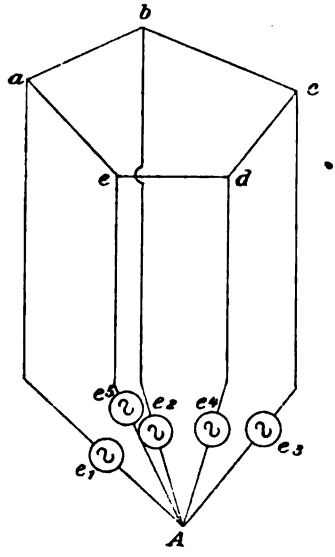
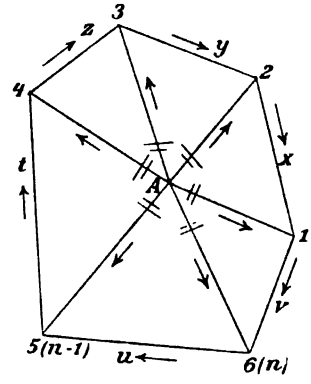


Fig. 20.



Die Aufgabe ist, wie im ersten Kapitel, aus den gegebenen EMK. und Widerständen die Ströme zu finden.

Wir wollen zuerst die Stromverteilung für Gleichstrom ableiten; nachher werden wir zeigen, dass die Resultate ohne weiteres für Wechselströme anwendbar sind, wenn wir algebraische Addition durch geometrische ersetzen.

Der Uebersichtlichkeit wegen bringen wir den Punkt A innerhalb des Netzes (Fig. 20), was natürlich in der Schaltung nichts ändert,

Digitized by Google

und denken uns in jede Zuleitung A 1, A 2 ... eine gewisse EMK. e_1, e_2 ..., z. B. eine Akkumulatorenbatterie, eingeschaltet. Wenn wir an den in Fig. 20 bezeichneten Stromrichtungen festhalten, die Widerstände der Zuleitungen mit r und diejenigen des Netzes mit R bezeichnen, so bekommen wir nach dem zweiten Kirchhoffschen Gesetze aus dem Dreieck A 2 1:

$$e_2 - e_1 = i_2 r_2 + x R_{21} - i_1 r_1.$$

Aber

$$i_2 = x - y; \; i_1 = v - x;$$

folglich

$$e_2 - e_1 = x(R_{21} + r_2 + r_1) - r_2 y - r_1 v.$$

Wenn wir die Spannungen e_1, e_2 ... als Phasenspannungen (Schenkel-) bezeichnen, so sind die Grössen $(e_2 - e_1)$, $(e_3 - e_2)$ ... nichts anderes, als die Klemmenspannungen, d. h. die Spannungen zwischen den Punkten $2-1$, $3-2$ ... bei offenem Stromkreise. Diese Spannungen bezeichnen wir mit E, so dass

$$\begin{aligned} e_2 - e_1 &= E_{21}, \\ e_3 - e_1 &= E_{32}, \\ &\cdots\cdots \end{aligned}$$

Sie sind ebenso, wie e_1, e_2 ..., bekannte Grössen.

Wenn wir noch der Abkürzung wegen

$$R_{21} + r_1 + r_2 = A$$

setzen, so bekommen wir schliesslich:

$$E_{21} = A x - r_2 y - r_1 v \quad \cdots\cdots \quad (1')$$

Es gibt so viele Gleichungen von dieser Form, als Phasen vorhanden sind, d. h. n; diese Gleichungen enthalten n unbekannte Ströme x, y ..., die daraus ermittelt werden können. Die Ströme in den Zuleitungen findet man aus

$$i_2 = x - y; \; i_3 = y - x; \ldots$$

und damit ist die Aufgabe vollständig gelöst.

Die n Gleichungen (1') sind:

$$\left\{\begin{aligned} E_{21} &= A x - r_2 y - r_1 v \\ E_{32} &= B y - r_3 z - r_2 x \\ E_{43} &= C z - r_4 t - r_3 y \\ &\cdots\cdots\cdots \\ &\cdots\cdots\cdots \\ E_{1n} &= F v - r_1 x - r_n u \end{aligned}\right. \quad \text{wo} \quad \left\{\begin{aligned} A &= R_{21} + r_2 + r_1 \\ B &= R_{32} + r_3 + r_2 \\ C &= R_{43} + r_4 + r_3 \\ &\cdots\cdots\cdots \\ &\cdots\cdots\cdots \\ F &= R_{1n} + r_1 + r_n \end{aligned}\right. \quad \cdots \quad (1)$$

Digitized by Google

Im allgemeinen Falle müssen diese Gleichungen als n Gleichungen mit n Unbekannten gelöst werden. Ein besonderes Interesse bietet uns aber der Fall, dass die Widerstände r im Vergleich mit R klein sind, da, nach dem Sinne der Aufgabe, die Energie hauptsächlich im Netze der Widerstände R verbraucht wird, und r nur Zuleitungen sind. In diesem Falle führt die Methode der allmählichen Annäherungen am ehesten zum Ziele. Die rechte Seite der Gleichungen (1) besteht aus drei Gliedern, von welchen das erste das Hauptglied und die anderen die Korrektionsglieder sind, da alle Ströme von derselben Grössenordnung, die Widerstände r aber klein im Vergleich mit R sind. Um also aus der ersten Gleichung die Grösse x bestimmen zu können, brauchen wir nicht die Ströme y und v besonders genau zu kennen, da dieselben nur in den Korrektionsgliedern vorkommen. Folglich, schreiben wir aus der zweiten und letzten Gleichung angenähert

$$y = \frac{E_{32}}{R_{32}} \quad \text{und} \quad v = \frac{E_{1n}}{R_{1n}}$$

und setzen diese Werte in die erste Gleichung ein, so bekommen wir bei kleinen r schon einen ziemlich genauen Wert von x. In dieser Weise bestimmen wir schnell sämtliche Ströme. Setzen wir die so erhaltenen Werte in dieselben Gleichungen wieder ein, so bekommen wir x, y ... schon in der zweiten Annäherung u. s. w. Dieses Verfahren ist viel leichter und führt schneller zum Ziele, als die unmittelbare Lösung von n Gleichungen, da dabei leicht Rechenfehler unterlaufen; ausserdem bekommen wir dabei komplizierte Formeln, in welchen viele Glieder mit Produkten von r so klein sind, dass sie keinen Einfluss auf das Resultat ausüben.

Um es zu zeigen, geben wir den genauen Ausdruck für x:

$$x = \frac{(E_{21})_1}{A_1}.$$

Dabei

$$A_1 = A - \frac{r'^2_1}{F_1} - \frac{r_2^2}{B} - \left(\frac{r_2 r_3}{B}\right)^2 \cdot \frac{1}{C_1} - \left(\frac{r_2 r_3 r_4}{B C_1}\right)^2 \frac{1}{D_1} - \ldots - \left(\frac{r_2 r_3 \ldots r_{n-1}}{B C_1 \ldots D_1}\right)^2 \cdot \frac{1}{E_1},$$

$$(E_{21})_1 = E_{21} + \frac{r'_1}{F}(E_{1n})_1 + \frac{r_2}{B} E_{32} + \frac{r_2 r_3}{B C_1}(E_{43})_1 + \frac{r_2 r_3 r_4}{B C_1 D_1}(E_{54})_1 + \ldots + \left(\frac{r_2 r_3 \ldots r_{n-1}}{B C_1 \ldots E_1}\right)(E_{n(n-1)})_1,$$

Digitized by Google

wo

$$r'_1 = r_1 + \frac{r_2 r_3 \ldots r_n}{B C_1 \ldots E_1}; \quad C_1 = C - \frac{r_3^2}{B}; \quad D_1 = D - \frac{r_4^2}{C_1}; \ldots$$

$$F_1 = F - \frac{r_n^2}{E_1}; \quad (E_{43})_1 = E_{43} + \frac{r_3}{B} E_{32}; \quad (E_{54})_1 = E_{54} + \frac{r_4}{C_1} (E_{43})_1; \ldots$$

$$(E_{1n})_1 = E_{1n} + \frac{r_n}{E_1} (E_{n(n-1)})_1.$$

Die anderen Ströme werden durch den Strom x bestimmt. Nämlich

$$v = \frac{(E_{1n})_1 + x r'_1}{F_1}; \quad u = \left[(E_{n(n-1)})_1 + v r_6 + \frac{r_2 r_3 r_4 r_5}{B C_1 D_1} x\right] \frac{1}{E_1};$$

$$t = \left[(E_{54})_1 + u r_5 + \frac{r_2 r_3 r_4}{B C_1} x\right] \frac{1}{D_1}; \ldots z = \left[(E_{43})_1 + t r_4 + x \frac{r_2 r_3}{B}\right] \frac{1}{C_1};$$

$$y = [E_{32} + z r_3 + x r_2] \frac{1}{B}.$$

Sind alle r verschwindend klein, so haben wir angenähert:

$$x = \frac{E_{21}}{A}; \quad y = \frac{E_{32}}{B}; \quad z = \frac{E_{43}}{C}; \ldots$$

Sind die Grössen r ziemlich klein (z. B. bilden sie einige Prozent von R), so können die Glieder mit der zweiten Potenz von r und höher vernachlässigt werden, so dass

$$A_1 = A; \ C_1 = C; \ D_1 = D; \ \ldots \ r'_1 = r_1 \quad \text{und} \quad x = \frac{(E_{21})_1}{A},$$

wobei

$$(E_{21})_1 = E_{21} + \frac{r_1}{F} (E_{1n})_1 + \frac{r_2}{B} \cdot E_{32}$$

$$(E_{43})_1 = E_{43} + \frac{r_3}{B} E_{32}; \quad (E_{54})_1 = E_{54} + \frac{r_4}{C} (E_{43})_1 \text{ u. s. w.}$$

$$v = \frac{1}{F} [(E_{1n})_1 + x r_1]; \quad u = \frac{1}{E} [(E_{n(n-1)})_1 + v r_6]; \ \ldots$$

$$z = \frac{1}{C} [(E_{43})_1 + t r_4]; \quad y = \frac{1}{B} [E_{32} + z r_3 + x r_2].$$

Diese Annäherung genügt vollständig, wenn die Grössen r nicht mehr als 10 % der Grössen R erreichen.

Sind die Widerstände r ziemlich gross oder sogar grösser als R, so bleibt natürlich nichts übrig, als entweder die Gleichungen (1) nach der allgemeinen Methode zu lösen, oder eventuell die vorhin angegebenen Lösungen zu benutzen. Die Reihen für A_1 und $(E_{21})_1$ sind bei $R < r$ nicht konvergent, und es ist unbedingt notwendig, alle Glieder zu berücksichtigen.

Digitized by Google

Für dreiphasiges System ist die genaue Lösung der Gleichungen (1) folgende:

$$x = \frac{(E_{21})_1}{A_1}; \quad z = \frac{(E_{13})_1 + x\,r'_1}{C_1}; \quad y = \frac{E_{32} + z\,r_3 + x\,r_2}{B}.$$

Dabei

$$A_1 = A - \frac{r_2^2}{B} - \frac{r'^2_1}{C_1}; \quad C_1 = C - \frac{r_3^2}{B};$$

$$(E_{21})_1 = E_{21} + E_{32} \cdot \frac{r_2}{B} + (E_{13})_1 \frac{r'_1}{C_1}; \quad (E_{13})_1 = E_{13} + \frac{r_3}{B} E_{32};$$

$$r'_1 = r_1 + \frac{r_2 r_3}{B}.$$

Für gewöhnliche Kraftübertragungen kann $A_1 = A$ und $C_1 = C$ gesetzt werden, da die Glieder mit r^2 klein sind; ebenso kann $r'_1 = r_1$ gesetzt werden. Dagegen müssen die Korrektionsglieder bei $(E_{21})_1$ und $(E_{13})_1$ beibehalten werden, da die Grössen r in denselben in der ersten Potenz eintreten.

Alle bisherigen Betrachtungen bezogen sich auf Gleichstrom. Es ist aber leicht zu zeigen, dass dieselben Lösungen auch für mehrphasige Stromkreise ohne Selbstinduktion und Kapazität gelten, wenn wir unter E die effektiven Werte verstehen, alle Glieder, die E enthalten, geometrisch addieren, dagegen sämtliche Widerstände A_1, C_1 ... wie vorher algebraisch bilden.

In der That gelten die Gleichungen (1) bei Wechselströmen für die Momentanwerte der EMK. und Ströme. Die Lösungen geben auch Momentanwerte; z. B. die Lösung

$$x = \frac{(E_{21})_1}{A_1}$$

ist jetzt folgendermassen zu verstehen:

$$x_{max} \sin(m\,t + \xi) = \frac{1}{A_1}\left[E_{21\,max} \sin(m\,t + \alpha_{21}) + \right.$$
$$\left. + \frac{r'_1}{F} (E_{1n})_{1\,max} \sin(m\,t + \alpha_{1n}) + \ldots\right].$$

Nach der bekannten Regel der Addition der Sinusfunktionen bekommen wir eine neue resultierende Sinusfunktion:

$$x_{max} \sin(m\,t + \xi) = \frac{(E_{21})_{1\,max}}{A_1} \sin[m\,t + (\alpha_{21})_1],$$

woraus folgt

$$x_{max} = \frac{(E_{21})_{1\,max}}{A_1} \quad \text{und} \quad \xi = (\alpha_{21})_1$$

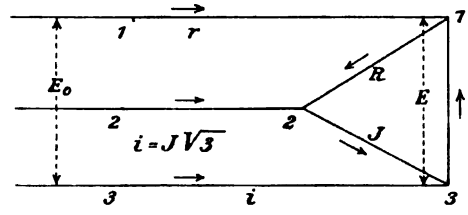
Digitized by Google

oder auch

$$x\,\text{eff} = \frac{(E_{21})_1\,\text{eff}}{A_1}.$$

Dieses Resultat ist so zu verstehen, dass der Vektor des Stromes x in die Richtung der Resultante der EMK. E_{21}, $\frac{r'_1}{F}(E_{1n})_1 \ldots$ fällt und der Grösse nach gleich diesem Vektor durch den Widerstand A_1 dividiert ist. Die Glieder $\frac{r'_1}{F}(E_{1n})_1$ u. s. w. sind natürlich bei der geometrischen Addition in der Richtung der Vektoren $(E_{1n})_1$ u. s. w. aufzutragen.

Fig. 21.

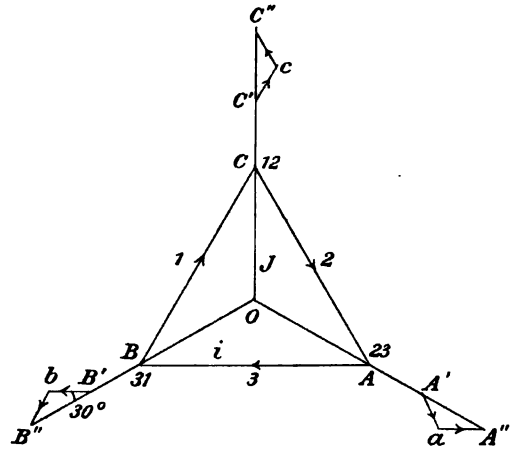


Man kann im allgemeinen sagen: was für Momentanwerte algebraisch gilt, gilt für Effektivwerte geometrisch.

Die Methode der allmählichen Annäherungen ist hier wohl in derselben Weise anwendbar, wie es früher für Gleichstrom angedeutet wurde, nur müssen die Korrektionsglieder mit dem Hauptgliede geometrisch kombiniert werden.

Wir wollen diese Betrachtungen am dreiphasigen System anwenden und fassen zuerst gleichmässige Belastung ins Auge.

Fig. 22.



Es seien OA, OB, OC (Fig. 22) die Ströme im Netze, dann sind AB, BC, CA die Ströme in den Zuleitungen. Die Klemmenspannungen E an den stromverbrauchenden Apparaten (Fig. 21) seien entsprechend OA', OB', OC'. Um die Klemmenspannungen E_0 in der Zentrale zu finden, müssen wir zu den Spannungen E den Spannungsabfall in den Zuleitungen hinzuaddieren. Nehmen wir die in Fig. 21 angedeuteten Stromrichtungen an, so sehen wir, dass die Spannungs-

Digitized by Google

abfälle in je zwei Zuleitungen einander entgegengesetzt wirken, so dass z. B.

$$(E_0)_{21} = E_{21} + r_1 i_1 - r_2 i_2$$

(momentan) und analog für die beiden anderen Klemmenspannungen. Im Vektordiagramm müssen die Grössen r i mit den Vektoren E geometrisch kombiniert werden, und wir bekommen die Vektoren $E_0 =$ OA″, OB″, OC″, die in diesem Falle dieselben Richtungen wie OA, OB, OC haben. Die Grössen $ir = Jr\sqrt{3}$, folglich sind die Spannungsabfälle A′A″ etc. $= 3rJ$; da aber $E = RJ$, so bekommen wir

$$E_0 = RJ + 3rJ$$

oder

$$J = \frac{E_0}{R + 3r}; \quad \frac{E}{E_0} = \frac{R}{R + 3r} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

d. h. wir können bei gleichmässiger Belastung die Spannung in der Zentrale dadurch bestimmen, dass wir diejenige an den stromverbrauchenden Apparaten im Verhältnisse $\frac{R + 3r}{R}$ vergrössern.

Das Verhältnis $\frac{E}{E_0} = \eta$ ist gleichzeitig der Wirkungsgrad der Kraftübertragung (natürlich nur mit Rücksicht auf die Linie selbst), und wenn wir das Verhältnis der Widerstände $\frac{r}{R}$ mit σ bezeichnen, so bekommen wir aus (2)

$$\eta = \frac{1}{1 + 3\sigma} \quad \text{oder} \quad \sigma = \frac{1 - \eta}{3\eta} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Dieselben Beziehungen können wir einfach aus den Gleichungen (1) bekommen. Wir haben $A = R + 2r$ und folglich

$$\bar{E}_{21} = (R + 2r)\,\bar{x} - r\,(\bar{y} + \bar{v}),$$

wobei die Striche über den Buchstaben geometrische Addition der Effektivwerte bedeuten. Der Symmetrie wegen sind alle Ströme einander gleich und um 120° gegeneinander verschoben, d. h.

$$\bar{y} + \bar{v} + \bar{x} = 0,$$

folglich

$$\bar{E}_{21} = (R + 2r)\,\bar{x} + r\,\bar{x},$$

oder

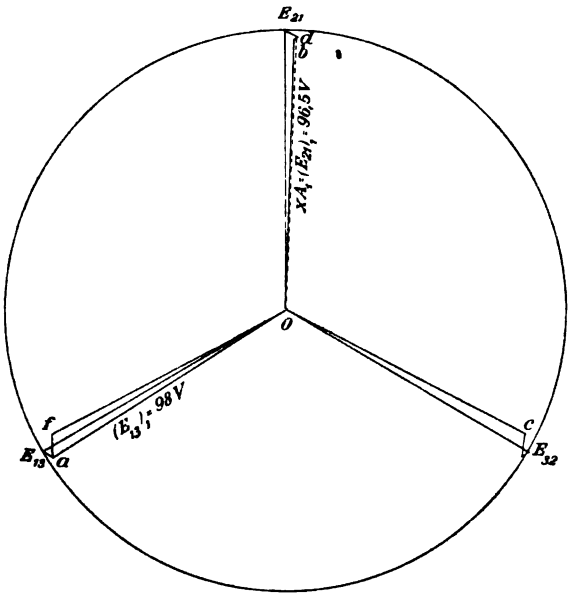
$$\bar{x} = \frac{E_{21}}{R + 3r},$$

Digitized by Google

d. h. dasselbe Resultat wie (2), da in den Gleichungen (1) die Ströme J mit x, y ... und die Spannungen E_0 in der Zentrale mit E_{21} ... bezeichnet sind.

Jetzt gehen wir zu ungleichmässiger Belastung über, wobei wir den Spannungsabfall in den Zuleitungen von einer bedeutenden Grösse nehmen, um die Verhältnisse klarer zu machen. Es sei ein System so berechnet, dass der Wirkungsgrad bei Vollbelastung 0,8 ist. Sind die Widerstände $R = 12\,\Omega$, so müssen nach (3) die Wider-

Fig. 23.



stände $r = 1\,\Omega$ sein. Wir untersuchen den Fall, dass das System nicht vollbelastet ist: es sei

$$R_{21} = 12\,\Omega$$
$$R_{32} = 20\,\Omega$$
$$R_{13} = 40\,\Omega$$

d. h. die Belastungen sich ungefähr wie 1,0 : 0,6 : 0,3 verhalten. Die Klemmenspannung E_0 in der Zentrale sei gleich 100 Volt (Fig. 23). Die Ströme und Spannungen an den Klemmen der stromverbrauchenden Apparate sind zu finden. Wir geben zuerst die genaue Lösung. Auf Grund der oben abgeleiteten Formeln haben wir

Digitized by Google

$$A = 12 + 1 + 1 = 14\,\Omega$$
$$B = 20 + 1 + 1 = 22\,\Omega$$
$$C = 40 + 1 + 1 = 42\,\Omega$$
$$r'_1 = 1 + \frac{1}{22} = 1{,}04\,\Omega$$
$$C_1 = 42 - \frac{1}{22} = \infty\, 42\,\Omega$$
$$A_1 = 14 - \frac{1}{22} - \frac{1{,}04^2}{42} = 13{,}93 \infty 14\,\Omega.$$

Man sieht, dass man trotz eines beträchtlichen Linienwiderstandes $C_1 = C$ und $A_1 = A$ setzen kann.

Die Spannung $(\bar{E}_{13})_1$ wird auf Grund der Formel $(\bar{E}_{13})_1 = \bar{E}_{13} + \bar{E}_{32} \cdot \frac{1}{22}$ konstruiert; derselben entspricht auf dem Diagramm der Vektor O a = 98 Volt. Ebenso finden wir graphisch

$$\overline{O\,b} = (\bar{E}_{21})_1 = \bar{E}_{21} + \frac{1}{22}\bar{E}_{32} + \frac{1{,}04}{42}(\bar{E}_{13})_1 = 96{,}5 \text{ Volt.}$$

Daraus

$$x = \frac{96{,}5}{13{,}93} = \mathbf{6{,}93} \text{ Amp.}$$

und fällt in die Richtung von O b,

$$z = \frac{1}{42}[(\bar{E}_{13})_1 + \overline{6{,}93} \times 1{,}04] = \mathbf{2{,}23} \text{ Amp.}$$

und fällt in die Richtung von O f.

Den Strom y finden wir aus der Formel

$$y = \frac{\bar{E}_{32} + \bar{z} \cdot 1 + \bar{x} \cdot 1}{22} = \mathbf{4{,}32} \text{ Amp.}$$

Der Vektor O c stellt die Spannung $\bar{E}_{32} + \bar{z} \cdot 1 + \bar{x} \cdot 1$ dar. Der Strom y hat natürlich auch dieselbe Richtung. Um jetzt die Klemmenspannungen zu finden, braucht man nur die gefundenen Ströme mit den Widerständen R zu multiplizieren.

Dasselbe Resultat bekommt man viel leichter mittels Annäherungen. Wir setzen in der ersten Annäherung

$$y' = \frac{100}{20} = 5 \text{ Amp.}$$
$$z' = \frac{100}{40} = 2{,}5 \text{ Amp.}$$

Digitized by Google

und nehmen an, die Richtungen dieser Ströme fallen in die Richtung der EMK. E_{32} bezw. E_{13}. Aus den Gleichungen (1) finden wir leicht graphisch

$$x'' = \frac{\bar{E}_{21} + 1 \cdot \bar{y}' + 1 \cdot \bar{z}'}{14} = 6{,}93 \text{ Amp.}$$

d. h. schon in der ersten Annäherung ganz dieselbe Grösse wie vorher bei der genauen Lösung. Der Vektor A x'' ist auf dem Diagramm mittels der punktierten Linie O b dargestellt; man sieht, dass diese Richtung mit der genauen nahezu zusammenfällt, und dass die Korrektionen beinahe dieselben bleiben, ob wir genaue oder angenäherte Werte von y und z benützen.

Aehnlich finden wir

$$y'' = \frac{1}{22}(\bar{E}_{32} + 1 \cdot \bar{z}' + 1 \cdot \bar{x}'') = 4{,}32 \text{ Amp.}$$

$$z = 2{,}23 \text{ Amp.}$$

Die Vektoren dieser Grössen fallen mit den genau berechneten vollständig zusammen.

Wir sehen, dass die zweite Annäherung in diesem Falle praktisch schon ganz genaue Resultate ergab. Es ist in jedem einzelnen Falle leicht, sich zu überzeugen, ob diese Annäherung genügt, indem man noch die Werte der dritten Annäherung ausrechnet. Dieser Weg der Lösung ist im allgemeinen vorzuziehen, da man dabei keine Koëffizienten vorher zu berechnen braucht, und unmittelbar die Gleichungen (1) anwendet, deren physikalische Bedeutung klar ist.

Die einzelnen Spannungen sind:

$$6{,}93 \times 12 = 83{,}2 \text{ Volt}$$
$$4{,}32 \times 20 = 86{,}4 \text{ „}$$
$$2{,}23 \times 40 = 89{,}2 \text{ „}$$

Die Unterschiede der Spannungen sind so beträchtlich, dass z. B. das betriebsmässige Brennen der Lampen in allen drei Phasen unmöglich wäre.

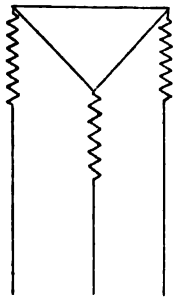
Wir bemerken noch zum Schluss, dass die Gleichungen (1) und deren Lösungen auch für den Fall gelten, dass ein Teil der Belastung sich in Hintereinanderschaltung mit den Zuleitungen befindet (Fig. 24), wie z. B. in der Schaltung von Dolivo-Dobrowolsky. Hier sind die Widerstände r bedeutend grösser und der genaue Weg wird vielleicht schneller zum Ziele führen, als die Methode der Annäherungen. Für diesen Fall ist übrigens eine andere Methode der Lösung be-

Digitized by Google

quemer, bei welcher man geometrische Addierungen vollständig vermeiden kann. Diese Methode ist ausführlich im dritten Kapitel behandelt.

Die oben angegebene Methode der allmählichen Annäherungen kann auch in denjenigen Fällen bequem angewendet werden, in welchen die Widerstände r zwar nicht klein sind, aber die angenäherten Werte von x, y . . . uns auf irgend welchem anderen Wege bekannt sind. Es können z. B. Fälle vorkommen, wo die Unterschiede der Belastungen in den einzelnen Phasen nicht gross sind. Hier können wir in der ersten Annäherung annehmen, die Belastungen seien in sämtlichen Phasen gleich, und die Ströme bestimmen, wie es für dreiphasiges System in Fig. 22 gezeigt wurde; dabei können wir für r und R mittlere Werte aus den gegebenen nehmen. Die so erhaltenen Ströme benützen wir in den Korrektionsgliedern der Gleichungen (1) und bestimmen aus denselben die Ströme in der zweiten Annäherung u. s. w. War der Grad der Ungleichmässigkeit der Belastung nicht gross, so finden wir in dieser Weise sehr schnell genügend genaue Werte.

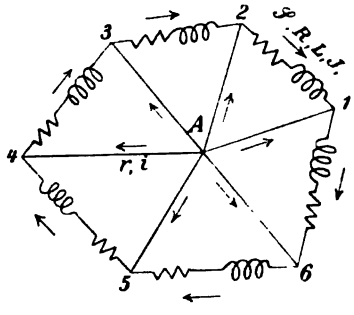
Fig. 24.



2. Selbstinduktion ist vorhanden, jedoch nur in den stromverbrauchenden Apparaten.

Es seien sämtliche Widerstände und die Grössen der Selbstinduktionskoëffizienten in den Leitern 12, 23 etc. (Fig. 25), oder, was auf dasselbe hinauskommt, die Grössen der Phasenverschiebungen φ zwischen den Strömen und EMK. in diesen Leitern gegeben. Die Zuleitungen seien induktionsfrei. Für die Momentanwerte der Ströme können wir ähnliche Gleichungen wie (1) aufstellen. Dabei wollen wir hier, wie auch in weiteren Betrachtungen, abgekürzte Bezeichnungen der Momentanwerte einführen. Anstatt $E \sin(mt+\alpha)$, $J \sin(mt+\eta)$ wollen wir einfach $E(\alpha)$, $J(\eta)$ schreiben. Das wird den Formeln eine übersichtlichere Form geben. Es sei die Spannung zwischen den Punkten 1 und 2 bei offenem Stromkreise $E_{21} \sin(mt+\alpha_{21})$, oder nach unserer abgekürzten Be-

Fig. 25.



Digitized by Google

zeichnung E_{21} (α_{21}), die Ströme im Netze seien ebenso durch Symbole J (η) und diejenigen in den Zuleitungen durch i (ξ) mit entsprechenden Nummern ausgedrückt. Die Phasenverschiebungen in den Leitern 1 2, 2 3 etc. seien φ, wo $\operatorname{tg}\varphi = \frac{mL}{R}$. Dann haben wir analog wie vorher:

$$E_{21}\,(\alpha_{21}) + r_1\,i_1\,(\xi_1) - r_2\,i_2\,(\xi_2) = J_{21}\,(\eta_{21} + \varphi_{21})\,u_{21} \quad . \quad . \quad (4)$$

Dabei bedeutet u_{21} den scheinbaren Widerstand des Leiters 2 1

$$u_{21} = \sqrt{R_{21}^{\,2} + m^2 L_{21}^{\,2}} = \frac{R_{21}}{\cos\varphi_{21}}.$$

Die Gleichung (4) ist bloss eine Anwendung des bekannten Theorems, dass, um in einem induktiven Widerstande den Strom J sin $(mt + \eta)$ zu erzeugen, eine EMK.

$$e_t = J\,.\,\sqrt{R^2 + m^2 L^2}\,.\,\sin\,(mt + \eta + \varphi),$$

oder nach abgekürzter Schreibweise

$$e_t = J\,u\,(\eta + \varphi)$$

nötig ist. Andererseits ist diese Spannung gleich der Spannung E_{21} um den Ohmschen Spannungsabfall in den Widerständen r_1 und r_2 vermindert. Bei den in Fig. 25 angedeuteten Stromrichtungen treten die Ströme i_1 und i_2 in die Gleichung (4) mit verschiedenen Vorzeichen ein. Diese Ströme können wir eliminieren, da nach dem ersten Kirchhoffschen Gesetze

$$\left.\begin{aligned} i_1\,(\xi_1) + J_{21}\,(\eta_{21}) &= J_{16}\,(\eta_{16}) \\ i_2\,(\xi_2) + J_{32}\,(\eta_{32}) &= J_{21}\,(\eta_{21}) \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Wir bekommen schliesslich

$$\begin{aligned} J_{21}\,[u_{21}\,(\eta_{21} + \varphi_{21}) + (r_1 + r_2)\,(\eta_{21})] - r_2\,J_{32}\,(\eta_{32}) - r_1\,J_{16}\,(\eta_{16}) \\ = E_{21}\,(\alpha_{21}) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6') \end{aligned}$$

Es lassen sich n solche Gleichungen aufstellen, aus welchen die Amplituden und die Phasen der n unbekannten Ströme bestimmt werden können. Die Ströme i in den Zuleitungen sind einfach geometrische Differenzen von je zweien benachbarten J, wie man aus den Gleichungen (5) sieht.

Die genaue Lösung der Gleichungen (4) werden wir nebst Anwendung auf dreiphasige Systeme später geben. Hier wollen wir zuerst eine einfache Methode der Lösung dieser Gleichungen mittels Annäherungen geben. Diese Methode ist der vorher beschriebenen für den Fall ohne Selbstinduktion ganz analog; in gewöhnlichen prak-

Digitized by Google

tischen Fällen, wo die Widerstände der Zuleitungen verhältnismässig klein sind, bekommt man schon in der zweiten Annäherung genügend genaue Werte.

Wir setzen in der Gleichung (6′)

$$u_{21}\,(\eta_{21} + \varphi_{21}) + (r_1 + r_2)\,(\eta_{21}) = A_{21}\,(\eta_{21} + \varphi'_{21}),$$

wo A_{21} die geometrische Summe der Vektoren u_{21} und $(r_1 + r_2)$, und φ'_{21} die entsprechende Phasenverschiebung ist (Fig. 26). Die Gleichung (6′) nimmt die Form

$$J_{21}\,A_{21}\,(\eta_{21} + \varphi'_{21}) = E_{21}\,(\alpha_{21}) + r_2\,J_{32}\,(\eta_{32}) + r_1\,J_{16}\,(\eta_{16})\ . \qquad (6)$$

an. Die Konstruktion von A ist in Fig. 26 dargestellt. OK ist eine beliebige Richtung; wir tragen $OC = u_{21}$ unter dem Winkel φ_{21} zu

Fig. 26.

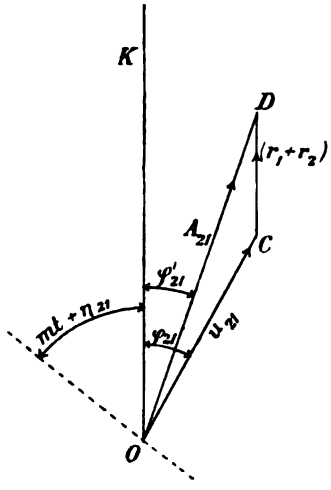
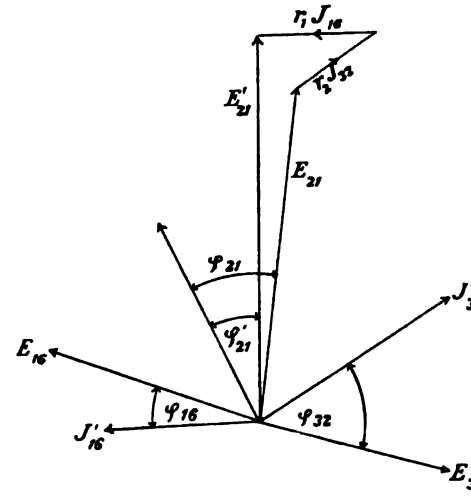


Fig. 27.



OK und dann $CD = (r_2 + r_1)$ parallel zu OK. Die Resultante OD stellt die Grösse A_{21} dar und der Winkel $KOD = \varphi'_{21}$. Die äquivalenten Widerstände A_{21}, A_{32} ... haben ähnliche Bedeutung wie A, B... in unseren früheren Betrachtungen; bei $\varphi_{21} = 0$ ist $u_{21} = R_{21}$; OD fällt mit OK zusammen und $A_{21} = R_{21} + r_2 + r_1$, d. h. dieselbe Grösse, die wir früher mit A bezeichnet haben. Früher haben wir die Widerstände R_{21}, r_2, r_1 algebraisch addiert, jetzt addieren wir dieselben geometrisch, um die Grösse A_{21} zu bekommen [1]).

[1]) Die analytischen Ausdrücke für φ'_{21} und A_{21} sind folgende:

$$\operatorname{tg}\varphi'_{21} = \frac{m\,L_{21}}{R_{21} + r_1 + r_2};\quad A_{21} = \sqrt{m^2 L^2_{21} + (R_{21} + r_1 + r_2)^2} = \frac{R_{21} + r_1 + r_2}{\cos\varphi'_{21}}.$$

Digitized by Google

Es seien uns die angenäherten Grössen und Richtungen der Vektoren J_{16} und J_{32} bekannt (Fig. 27). Wir bilden die geometrische Summe

$$\overline{E}_{21} + r_1 \overline{J}_{16} + r_2 \overline{J}_{32},$$

die gleich dem Vektor $\overline{E}'_{21}$ sei. Aus Gleichung (6) erhält man:

$$E'_{21}\,(\alpha'_{21}) = J_{21}\,A_{21}\,(\eta_{21} + \varphi'_{21}),$$

oder

$$J_{21} = \frac{E'_{21}}{A_{21}} \quad \text{und} \quad \eta_{21} = \alpha'_{21} - \varphi'_{21}.$$

Folglich, der Strom J_{21} ist gleich der Spannung E'_{21} durch den Widerstand A_{21} dividiert und eilt derselben um den Winkel φ'_{21} nach (Fig. 27). Die angenäherten Werte der Ströme J_{32} und J_{16} sind ähnlich zu finden, wie wir früher diejenigen der Ströme y, z ... fanden. Wir setzen alle $r = 0$, d. h. denken uns die Spannungen E_{16} und E_{36} unmittelbar an den Enden der Widerstände u_{16} und u_{32} wirkend. Dann sind die Ströme J_{16} und J_{32} gleich: $J'_{32} = \frac{E_{32}}{u_{32}}$ und $J'_{16} = \frac{E_{16}}{u_{16}}$, und sind gegen die betreffenden E um die Winkel φ verschoben (Fig. 27). Haben wir einmal alle Ströme gefunden, so können wir die Konstruktion wiederholen und noch genauere Werte finden u. s. w. Es ist selbstverständlich, dass diese Methode auch dann gut anwendbar ist, wenn die Widerstände r nicht klein sind, aber die angenäherten Werte der Ströme uns auf irgend welchem anderen Wege bekannt sind, z. B. wenn der Grad der Ungleichmässigkeit der Belastung nicht gross ist, wie es schon früher erläutert wurde.

Dreiphasiges System, gleichmässige Belastung. Hier bekommen wir die genaue Lösung ganz analog, wie für den Fall ohne Selbstinduktion. Es seien wieder (Fig. 28) OA, OB, OC die Ströme J in den Widerständen u. Die entsprechenden Spannungen OA', OB', OC' eilen diesen Strömen um die Winkel φ voraus und sind gleich uJ. Um die Spannung in der Zentrale zu bekommen, müssen wir zu diesen Spannungen noch den Spannungsabfall in den Zuleitungen hinzuaddieren. Dieser Spannungsabfall ist ebenso, wie vorhin (Fig. 22), gleich $B'B'' = 3rJ$. Die Spannung in der Zentrale ist somit gleich OB'' und kann leicht graphisch gefunden werden. Analytisch haben wir für OB'' folgenden Ausdruck aus dem Dreieck OB'B'', in welchem $\sphericalangle$ OB'B'' gleich $180^0 - \varphi$ ist, da B'B'' // OB ist.

$$OB'' = E_0 = J\sqrt{u^2 + 9r^2 + 6ru\cos\varphi}.$$

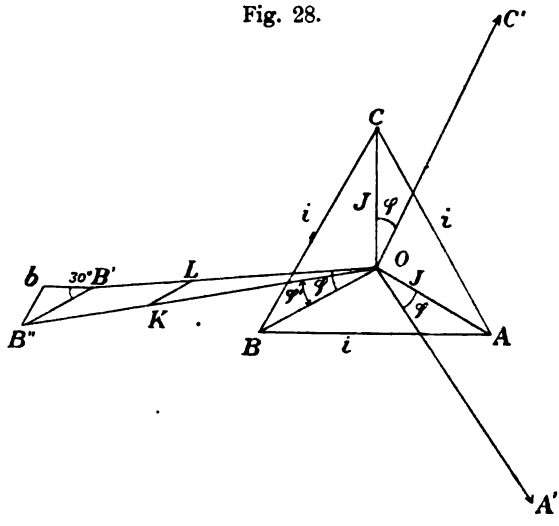
Digitized by Google

Die nützlich verbrauchbare Energie ist $3J^2R$, der Verlust in den Zuleitungen $3i^2r = 9J^2r$, folglich der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{3RJ^2}{3RJ^2 + 9rJ^2} = \frac{R}{R + 3r},$$

d. h. ebenso gross wie ohne Selbstinduktion. Dieses Resultat bedeutet aber, dass die bei Selbstinduktion übertragbare Energie kleiner ist, als im Falle ohne Selbstinduktion, gleiche Spannung und gleichen Wirkungsgrad vorausgesetzt. In der That, es sei zuerst keine Selbst-

Fig. 28.



induktion vorhanden und die Kraftübertragung habe einen gewissen Wirkungsgrad $\eta = \frac{R}{R + 3r}$. Wir fügen den Widerständen R gewisse Selbstinduktionen zu; der Wirkungsgrad bleibt derselbe, wie aus der obigen Formel folgt, aber die Ströme und somit die Energiemengen werden kleiner.

Ist uns die Spannung E_0 in der Zentrale gegeben und werden die Ströme J gesucht, so konstruieren wir das Dreieck OLK (Fig. 28), in welchem $OL = u$, $LK = 3r$ und $\sphericalangle OLK = (180° - \varphi)$, wobei OK mit der Richtung E_0 zusammenfällt. Es ist $\frac{OB''}{OK} = \frac{OB'}{OL}$, oder $\frac{E_0}{OK} = \frac{uJ}{u} = J$, d. h. der Strom J ist gleich der Spannung E_0 dividiert durch den Widerstand OK. Die Richtung des Stromes bildet

Digitized by Google

den Winkel φ mit der Richtung OL. Die beiden anderen Ströme sind um 120^0 verschoben und damit auch bestimmt.

Die Anwendung der Formel (6) gibt dasselbe Resultat. Da

$$r_1 = r_2 = r_3 = r \quad \text{und} \quad J_{23} + J_{31} = - J_{21},$$

so bekommen wir einfach

$$J_{21} [u_{21} (\eta_{21} + \varphi_{21}) + 3r (\eta_{21})] = E_{21} (\alpha_{21}).$$

Der Ausdruck in den Klammern ist die geometrische Summe von u_{21} und $3r$, d. h. ist gleich dem Widerstande $\overline{OK}$, folglich

$$J_{21} \overline{OK} . (\eta_{21} + \varphi'_{21}) = E_{21} (\alpha_{21}),$$

woraus $J_{21} = \frac{E_{21}}{\overline{OK}}$ und $\eta = \alpha_{21} - \varphi'_{21}$, was mit dem eben erhaltenen Resultat übereinstimmt.

Dreiphasiges System, ungleichmässige Belastung. Es sei gegeben:

$$r_1 = r_2 = r_3 = 2\Omega; \; R_{21} = 12\Omega; \; R_{32} = 20\Omega; \; R_{13} = 40\Omega.$$
$$\cos\varphi_{12} = 0{,}8; \; \cos\varphi_{32} = 0{,}6; \; \cos\varphi_{13} = 0{,}7 \text{ (Voreilung)}.$$

Um zu zeigen, dass die vorhin abgeleiteten Formeln (6) allgemein gelten, haben wir in der Phase 1—3 nicht Selbstinduktion, sondern Kapazität und dementsprechend eine Voreilung des Stromes vorausgesetzt. Es ist bekannt, dass bei sinusförmigen Wechselströmen die Formeln, die für den Fall der Selbstinduktion abgeleitet sind, ihre Giltigkeit auch für den Fall der Kapazität behalten, wenn mL durch $-\frac{1}{mC}$ ersetzt wird, d. h. die Kapazität als die negative Selbstinduktion $L = -\frac{1}{m^2 C}$ aufgefasst wird.

Die drei gegebenen Vektoren der EMK. seien einander nicht gleich, nämlich

$$E_{21} = 100 \text{ V}; \; E_{32} = 60 \text{ V}; \; E_{13} = 80 \text{ V};$$

und nicht symmetrisch angeordnet, sondern so, wie es in Fig. 29 angedeutet ist.

Zuerst konstruieren wir nach der früher angegebenen Methode die kombinierten Widerstände A (Fig. 30) und ziehen im Diagramm (Fig. 29) die Richtungen J'_{32} und J'_{13}, die gegen die entsprechenden EMK. um die Winkel arccos 0,6 und arccos 0,7 nach- bezw. voreilen. Das sind die Richtungen der Ströme J_{32} und J_{13} in der ersten

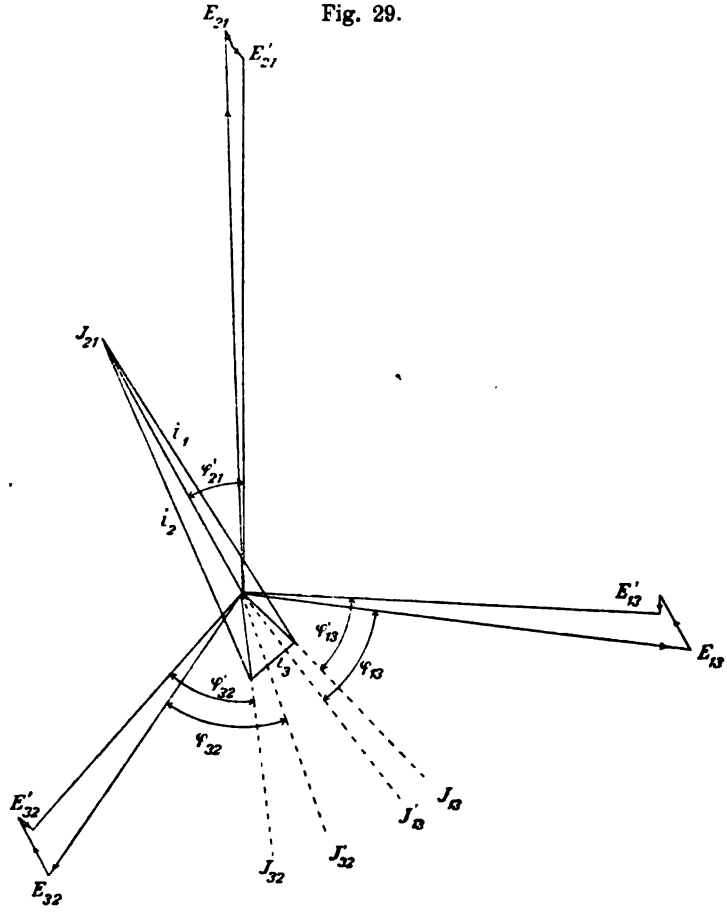
Digitized by Google

Annäherung. Die Grössen dieser Ströme nach der Formel $J' = \frac{E}{u}$ $= \frac{E \cos \varphi}{R}$ berechnet, sind

$$J'_{32} = \frac{60 \times 0{,}6}{20} = 1{,}8 \text{ Amp.} \quad \text{und} \quad J'_{13} = \frac{80 \times 0{,}7}{40} = 1{,}4 \text{ Amp.}$$

Addieren wir geometrisch zu dem Vektor E_{21} die Grössen $r_2 J'_{32}$ und $r_1 J'_{13}$

Fig. 29.



$= 3{,}6$ bezw. $2{,}8$ Volt, so bekommen wir den Vektor $E'_{21} = 94{,}5$ Volt.

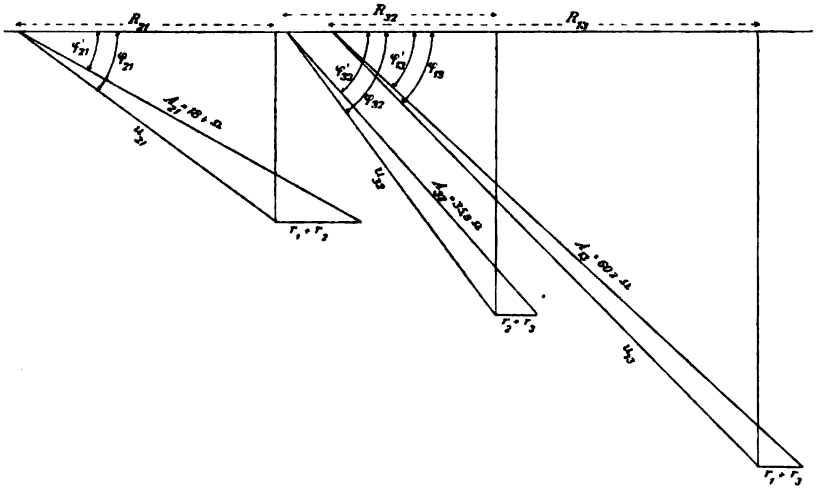
$$J_{21} = \frac{E'_{21}}{A_{21}} = \frac{94{,}5}{18{,}4} = 5{,}14 \text{ Amp.}$$

Der Winkel φ'_{21} zwischen E'_{21} und J_{21} ist uns aus dem Diagramm

Digitized by Google

Fig. 30 schon bekannt, und damit ist der Strom J_{21} vollständig bestimmt; ebenso finden wir die beiden anderen Ströme in der zweiten Annäherung. Sie sind im Diagramm mit J_{32} und J_{13} bezeichnet und der Grösse nach gleich $J_{32} = 1{,}58$ und $J_{13} = 1{,}25$ Amp. Wenn wir jetzt diese genaueren Werte von J_{32} und J_{13} wieder für die Konstruktion von J_{21} benützen, so finden wir nahezu denselben Wert. Folglich genügt die vorige Annäherung. Die Ströme i in den Zuleitungen

Fig. 30.



finden wir, indem wir die Enden der Vektoren J miteinander verbinden. Der Wirkungsgrad des Systems ist

$$\eta = \frac{\Sigma R J^2}{\Sigma R J^2 + \Sigma r i^2} = 0{,}72.$$

In praktischen Fällen, in welchen die Widerstände der Zuleitungen relativ noch bedeutend kleiner sind, dürfte somit die Methode schon nach der ersten Annäherung sehr genaue Werte geben.

Wir wenden uns jetzt zu der genauen Lösung der Gleichungen von der Form (6). Es genügt dies für ein dreiphasiges System zu zeigen; das Verfahren ist für eine grössere Anzahl der Phasen ganz analog. Die Gleichungen (6) nehmen für ein dreiphasiges System die Gestalt

$$\left.\begin{aligned} J_{21} A_{21} (\eta_{21} + \varphi'_{21}) &= E_{21} (\alpha_{21}) + r_1 J_{13} (\eta_{13}) + r_2 J_{32} (\eta_{32}) \\ J_{32} A_{32} (\eta_{32} + \varphi'_{32}) &= E_{32} (\alpha_{32}) + r_2 J_{21} (\eta_{21}) + r_3 J_{13} (\eta_{13}) \\ J_{13} A_{13} (\eta_{13} + \varphi'_{13}) &= E_{13} (\alpha_{13}) + r_3 J_{32} (\eta_{32}) + r_1 J_{21} (\eta_{2_1}) \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

Digitized by Google

an. Wir können diese Gleichungen lösen, indem wir einmal $mt = 0$ und dann $mt = \frac{\pi}{2}$ setzen, wodurch wir sechs Gleichungen bekommen, die zur Bestimmung der drei Amplituden und Phasen der Ströme J genügen. Diese Methode führt aber zu ziemlich komplizierten Formeln; die Gleichungen (7) können viel einfacher auf Grund folgenden Theorems gelöst werden:

Besteht die Gleichung

$$f(t) = \Sigma A_i \sin (mt + \alpha_i) = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

für jedes beliebige t, so besteht auch die Gleichung

$$F(t) = \Sigma A_i \sin (mt + \alpha_i + \varphi) = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

wo φ ein beliebiger Winkel ist. Geometrisch betrachtet drückt die Gleichung (8) aus, dass die Vektoren A_i ein geschlossenes Polygon bilden. Die Gleichung (9) drückt aus, dass dieses Polygon geschlossen bleibt, wenn wir alle Vektoren um einen und denselben Winkel φ drehen, was auch selbstverständlich ist.

Man kann auch einen einfachen analytischen Beweis geben. Gilt die Gleichung (8) für alle Werte von t, so ist

$$\frac{df(t)}{dt} = m \Sigma A_i \cos (mt + \alpha_i) = 0,$$

oder

$$\Sigma A_i \cos (mt + \alpha_i) = 0.$$

Wir multiplizieren diese Gleichung mit $\sin \varphi$, die Gleichung (8) mit $\cos \varphi$ und addieren beide zusammen. Dann bekommen wir:

$$\Sigma A_i \cos \varphi \sin (mt + \alpha_i) + \Sigma A_i \sin \varphi \cos (mt + \alpha_i) = 0,$$

woraus die Gleichung (9) unmittelbar folgt. In unserer abgekürzten Weise können die Gleichungen (8) und (9) folgendermassen geschrieben werden:

$$\Sigma A_i (\alpha_i) = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$
$$\Sigma A_i (\alpha_i + \varphi) = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (11)$$

wobei die Gleichung (11) eine unmittelbare Folge der Gleichung (10) ist, wie wir es eben bewiesen haben.

Auf Grund dieses Theorems können die drei Gleichungen (7) leicht aufgelöst werden. Wir verschieben sämtliche Vektoren in der zweiten Gleichung um den Winkel φ'_{32}, d. h. schreiben dieselbe in der Form:

$$A_{32} J_{32} (\eta_{32}) = E_{32} (\alpha_{32} - \varphi'_{32}) + r_2 J_{21} (\eta_{21} - \varphi'_{32}) + r_3 J_{13} (\eta_{13} - \varphi'_{32}),$$

Digitized by Google

dividieren durch A_{32} und setzen die Grösse J_{32} (η_{J2}) in die erste und dritte Gleichung ein. Dann bekommen wir:

$$\left.\begin{aligned} J_{21}\left[A_{21}(\eta_{21}+\varphi'_{21})-\frac{r_2^2}{A_{32}}(\eta_{21}-\varphi'_{32})\right] &= E_{21}(\alpha_{21})+ \\ +\frac{r_2}{A_{32}}E_{32}(\alpha_{32}-\eta'_{32})+J_{13}\left[r_1(\eta_{13})+\frac{r_2 r_3}{A_{32}}(\eta_{13}-\varphi'_{32})\right]&; \\ J_{13}\left[A_{13}(\eta_{13}+\varphi'_{13})-\frac{r_3^2}{A_{32}}(\eta_{13}-\varphi'_{32})\right] &= E_{31}(\alpha_{31})+ \\ +\frac{r_3}{A_{32}}E_{32}(\alpha_{32}-\varphi'_{32})+J_{21}\left[r_1(\eta_{21})+\frac{r_2 r_3}{A_{32}}(\eta_{21}-\varphi'_{32})\right]& \end{aligned}\right\} \quad (12)$$

Das sind zwei Gleichungen mit zwei Unbekannten; der Strom J_{32} (η_{32}) ist daraus eliminiert. Nach demselben Verfahren kann wieder eine der Unbekannten J aus den Gleichungen (12) eliminiert werden.

Dazu ersetzen wir die Ausdrücke in den Klammern [ ] bei den Unbekannten J durch die Ausdrücke $A''(\eta-\varphi'')$, wo A'' und φ'' bekannte Grössen sind (s. Fig. 26 und 33), und verschieben sämtliche Vektoren in einer der Gleichungen um einen solchen Winkel, dass der zu eliminierende Vektor in die beiden Gleichungen mit einem und demselben Phasenwinkel eintritt; dann kann dieser Vektor auf gewöhnliche Weise eliminiert werden. Wir bekommen schliesslich

$$J_{21}\cdot A'_{21}(\eta_{21}+\Phi_{21})=E'_{21}\ (\alpha'_{21}),$$

woraus

$$J_{21}=\frac{E'_{21}}{A'_{21}} \quad \text{und} \quad \eta_{21}=\alpha'_{21}-\Phi_{21}.$$

Dabei ist

$$\overline{A}'_{21}=\overline{A}_{21}-\frac{\overline{r}_2^{\,2}}{A_{32}}-\frac{\overline{r'}_1^{\,2}}{A''_{13}};$$

$$\overline{E}'_{21}=\overline{E}_{21}+\frac{r_2}{A_{32}}\overline{E}_{32}+\frac{r'_1}{A''_{13}}\overline{E}'_{13}.$$

Sämtliche Grössen sind geometrisch zu addieren, alle Winkel zu dieser Addition sind bekannt.

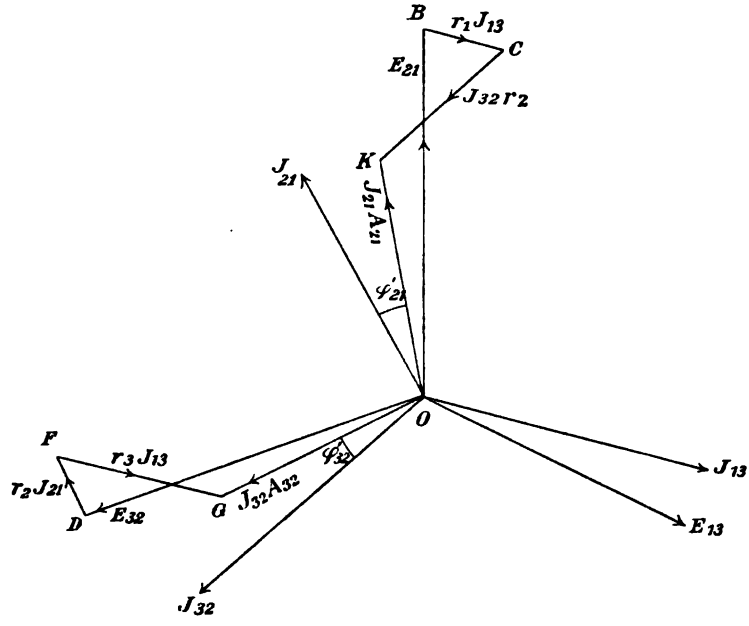
Vergleichen wir diese Lösung mit derjenigen der Gleichungen (1) für den Fall ohne Selbstinduktion, so sehen wir, dass beide identisch sind; nur haben wir dort in den Ausdrücken für A algebraische und hier geometrische Addition. Sind alle $\varphi=0$, d. h. keine Selbstinduktion vorhanden, so stimmen beide Lösungen überein.

Die angewendete Methode der Elimination von J (η) hat eine einfache geometrische Bedeutung. Es sei OBCK (Fig. 31) das ge-

Digitized by Google

schlossene Viereck der Vektoren, welche in die erste der Gleichungen (7) eintreten; ähnlich entspreche das Viereck ODFG der zweiten der Gleichungen (7). Die Aufgabe der Elimination von J_{32} kann hier folgendermassen ausgedrückt werden: es wird verlangt, die beiden Vierecke in eine solche geschlossene Figur zu kombinieren, welche den

Fig. 31.



Vektor J_{32} nicht enthält. Wir reduzieren das Viereck ODFG im Massstabe $\frac{r_2}{A_{32}}$ und drehen dasselbe in dem mit dem Pfeile angedeuteten Sinne um den Winkel φ'_{32}. Jetzt ist OG gleich und parallel zu CK und wenn wir die beiden Vielecke zusammenlegen, so bekommen wir die geschlossene Figur OBCDFKO (Fig. 32), in welcher der Vektor KC, der dem Strome J_{32} proportional ist, nicht mehr eintritt. Die Bedingung, dass diese Figur eine geschlossene ist, d. h. dass die geometrische Summe der Vektoren = 0 ist, wird folgendermassen ausgedrückt:

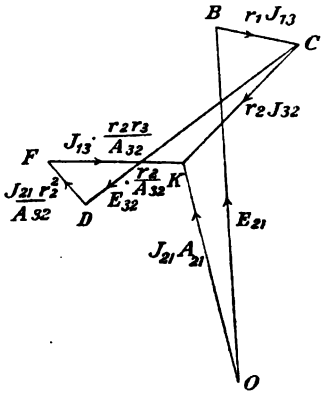
$$\bar{J}_{21}\left(\bar{A}_{21} - \frac{\bar{r}_2^{\,2}}{A_{32}}\right) - \bar{J}_{13}\left(\bar{r}_1 + \frac{\bar{r}_2\, r_3}{A_{32}}\right) - \bar{E}_{21} - \bar{E}_{32}\,\frac{r_2}{A_{32}} = 0,$$

was mit der ersten der Gleichungen (12) vollständig übereinstimmt.

Digitized by Google

Es ist klar, dass auf Grund des Theorems (11) nicht nur drei, sondern allgemein n Gleichungen von der Form (6) gelöst werden können. Dabei muss man aber während der Elimination der Unbekannten zahlreiche A'' und E' konstruieren. An der entsprechenden Stelle des dritten Kapitels wird gezeigt, dass die Aufgabe auf die Lösung von 2n Gleichungen zurückgeführt werden kann, in welchen keine trigonometrischen Funktionen bezw. keine geometrischen Additionen vorkommen und welche einfach algebraisch zu lösen sind. Das wird der einfachste mögliche Weg der Lösung sein, wenn die Methode der allmählichen Annäherungen unanwendbar ist.

Fig. 32.



Als eine Anwendung des Theorems (11) geben wir noch einen einfachen Beweis für die Gleichungen (6) des ersten Kapitels. Wir haben

$$k(\varkappa) = e(\alpha) - a(\beta),$$

wo die Buchstaben in Klammern die den einzelnen Vektoren entsprechenden Phasenwinkel bedeuten[1]). Nach dem Theorem (11) können wir diese Gleichung auch in der Form

$$\frac{k(\varkappa - \psi)}{v} = \frac{e(\alpha - \psi)}{v} - \frac{a(\beta - \psi)}{v} \quad . \quad . \quad . \quad (12a)$$

darstellen; der Ausdruck $\frac{k(\varkappa - \psi)}{v}$ ist gleich dem Strome $i(\xi)$, da wir dabei die Spannung k um den Winkel ψ verschieben und durch den scheinbaren Widerstand v dividiren.

Da $\Sigma i(\xi) = 0$, so haben wir

$$\Sigma \frac{e(\alpha - \psi)}{v} - a \Sigma \frac{(\beta - \psi)}{v} = 0.$$

In dieser Formel ist $\Sigma \frac{e(\alpha - \psi)}{v} = J(\xi_j)$ die Resultante der fiktiven Ströme, und $\Sigma \frac{(\beta - \psi)}{v} = \frac{\beta - \psi_0}{V}$, wo ψ_0 und V aus der Konstruktion der Fig. 15 bekannt sind. Folglich

[1]) D. h. $k \sin(mt + k) = e \sin(mt + \alpha) - a \sin(mt + \beta)$; diese Gleichung bedeutet einfach, dass k die geometrische Differenz von e und a ist.

Digitized by Google

$$J(\xi_J) = \frac{a(\beta - \psi_0)}{V},$$

woraus

$$a = JV; \quad \beta = \xi_J + \psi_0,$$

d. h. a ist gleich der Resultante J mit dem äquivalenten scheinbaren Widerstande V multipliziert und eilt dieser Resultante um den Winkel ψ_0 voraus; dieses Resultat haben wir schon früher auf einem anderen Wege gefunden.

3. Auch in den Zuleitungen ist Selbstinduktion oder Kapazität vorhanden.

Es seien alle früheren Bezeichnungen beibehalten und noch dazu die scheinbaren Widerstände der Zuleitungen mit v_1, v_2 etc., und die Phasenverschiebungen mit $\cos\psi_1 = \frac{r_1}{v_1}$, $\cos\psi_2 = \frac{r_2}{v_2}$ etc. bezeichnet. Den Gleichungen (4) analog haben wir

$$E_{21}(a_{21}) + v_1 i_1 (\xi_1 + \psi_1) - v_2 i_2 (\xi_2 + \psi_2) = J_{21} u_{21} (\eta_{21} + \varphi_{21}) \quad (13)$$

denn dem Strome $i_1(\xi_1)$ in der Leitung r_1 entspricht jetzt der momentane Spannungsabfall

$$v_1 i_1 (\xi_1 + \psi_1),$$

weil der Vektor dieses Spannungsabfalles demjenigen des Stromes um den Winkel ψ_1 voreilt. Den Gleichungen (5) entsprechen ganz dieselben Gleichungen

$$\left.\begin{aligned} i_1(\xi_1) + J_{21}(\eta_{21}) &= J_{16}(\eta_{16}) \\ i_2(\xi_2) + J_{32}(\eta_{32}) &= J_{21}(\eta_{21}) \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (5)$$

da sie nur die Ströme enthalten.

Diese Gleichungen können nach dem Satze (11) auch in der folgenden Form geschrieben werden:

$$\left.\begin{aligned} i_1(\xi_1 + \psi_1) + J_{21}(\eta_{21} + \psi_1) &= J_{16}(\eta_{16} + \psi_1) \\ i_2(\xi_2 + \psi_2) + J_{32}(\eta_{32} + \psi_2) &= J_{21}(\eta_{21} + \psi_2) \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad (14)$$

Die Werte von i_1 und i_2 aus diesen Gleichungen in (13) eingesetzt geben uns:

$$J_{21} A_{21} (\eta_{21} + \varphi'_{21}) = E_{21}(\alpha_{21}) + v_1 J_{16}(\eta_{16} + \psi_1) + v_2 J_{32}(\eta_{32} + \psi_2) \ldots \quad (15)$$

wenn wir die geometrische Summe

$$\bar{u}_{21} + \bar{v}_1 + \bar{v}_2$$

mit A_{21} bezeichnen und dementsprechend einen Winkel φ'_{21} einführen.

Digitized by Google

Die n Gleichungen von der Form (15) haben ganz dieselbe Gestalt wie die Gleichung (6) und können genau so gelöst werden. Bei der Addierung der Widerstände v_1 und v_2 zur Bildung der Grösse A_{21} müssen natürlich die entsprechenden Winkel ψ_1 und ψ_2 berücksichtigt werden (Fig. 33). Ist in den Zuleitungen keine Selbstinduktion vorhanden, so bekommen wir unsere frühere Konstruktion für A_{21} (Fig. 26).

Fig. 33.

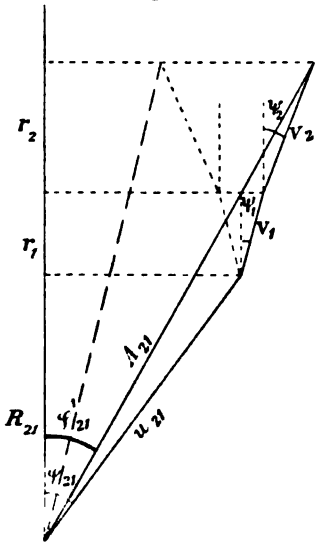
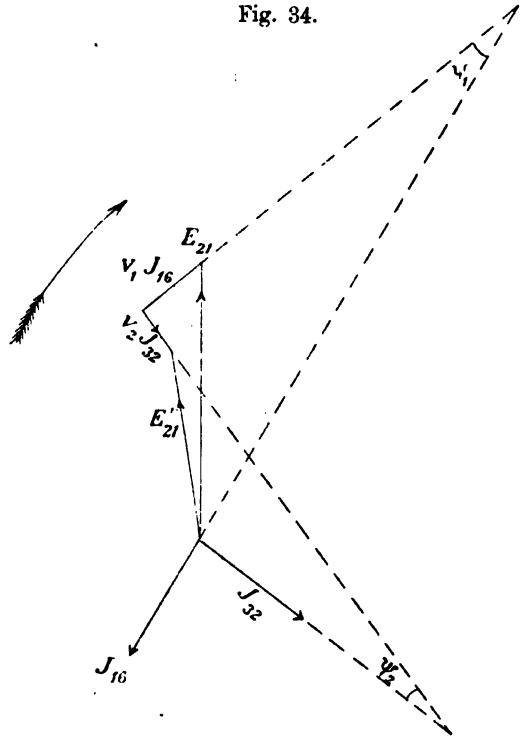


Fig. 34.



Ist anstatt Selbstinduktion Kapazität vorhanden (z. B. bei Kabeln), so sind die Winkel ψ nach der anderen Seite der Vertikalen aufzutragen (punktiert in Fig. 33 angedeutet).

Das Verfahren der Lösung der Gleichungen (15) mittels Annäherungen besteht wieder darin, dass man zuerst sämtliche $v = 0$ setzt, die Vektoren J_{16} und J_{32} auf Grund der Beziehungen

$$J_{16} = \frac{E_{16}}{u_{16}} \quad \text{und} \quad J_{32} = \frac{E_{32}}{u_{32}}$$

konstruiert, dann den Vektor J_{21} aus der Gleichung (15) findet u. s. w. Bei der Bildung der Korrektionsglieder $v_1 J_{16}$ und $v_2 J_{32}$ in der Glei-

Digitized by Google

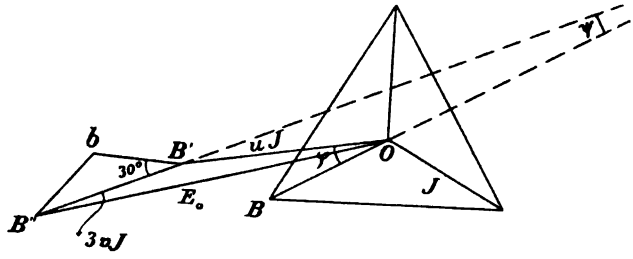
chung (15) ist zu beachten, dass dieselben nicht wie vorher parallel den Strömen J_{16} und J_{32} gezogen werden dürfen, sondern unter den Winkeln ψ_1 bezw. ψ_2 im Sinne der Voreilung gegen dieselben. Das folgt daraus, dass wir jetzt nicht wie in der Gleichung (6) $r_1 J_{16} (\eta_{16})$ und $r_2 J_{32} (\eta_{32})$, sondern

$$v_1 J_{16} (\eta_{16} + \psi_1) \quad \text{und} \quad v_2 J_{32} (\eta_{32} + \psi_2)$$

haben. Die Fig. 34 macht das Gesagte klarer.

Ist in den Zuleitungen Kapazität vorhanden, so sind die Winkel ψ_1 und ψ_2 als negativ aufzufassen und dementsprechend die Vektoren $v_1 J_{16}$ und $v_2 J_{32}$ im Sinne der Nacheilung aufzutragen.

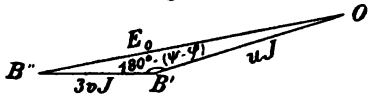
Fig. 35.



Ueber die genaue Lösung der Gleichungen (15) brauchen wir nicht mehr zu sprechen, da für dieselben alles von den Gleichungen (6) Gesagte gilt.

Der Fall einer gleichmässigen Belastung eines Dreiphasensystems verdient erwähnt zu werden. Das entsprechende Diagramm (Fig. 35) ist demjenigen für den Fall ohne Selbstinduktion in den Zuleitungen (Fig. 28) ähnlich, nur die Strecke $B' B''$ ist nicht mehr $= 3rJ$, sondern $= 3vJ$ und zu dem Vektor OB nicht mehr parallel, sondern unter dem Winkel ψ im Sinne der Voreilung gegen ihn geneigt.

Fig. 35a.



Der Winkel $OB'B''$ ist somit $= 180^0 - (\varphi - \psi)$. Das Dreieck $OB''B'$ können wir wiederum bei gegebener EMK. E_0 in der Zentrale konstruieren und die Ströme J und i finden. Ist $\varphi < \psi$, so ist $\sphericalangle OB'B'' > 180^0$, der Winkel $OB'B'' = 180^0 - (\psi - \varphi)$, und der Punkt B'' liegt dabei nach der anderen Seite der Geraden OB' (Fig. 35a). Ist einer der Winkel (φ oder ψ) negativ (Kapazität), so ist das bei der Konstruktion des Diagramms und in der Formel $\sphericalangle OB'B'' = 180^0 - (\varphi - \psi)$ entsprechend zu berücksichtigen. Das Diagramm (Fig. 35) kann auch

Digitized by Google

leicht aus der Formel (15) abgeleitet werden. Für Dreiphasensystem und gleichmässige Belastung haben wir:

$$J_{21}[u(\eta_{21}+\varphi)+2v(\eta_{21}+\psi)] = E_{21}(\alpha_{21})+v[J_{13}(\eta_{13}+\psi) + J_{32}(\eta_{32}+\psi)].$$

Da aber

$$J_{13}(\eta_{13})+J_{32}(\eta_{32}) = -J_{21}(\eta_{21}),$$

oder

$$J_{13}(\eta_{13}+\psi)+J_{32}(\eta_{32}+\psi) = -J_{21}(\eta_{21}+\psi),$$

so bekommen wir

$$J_{21}[u(\eta_{21}+\varphi)+3v(\eta_{21}+\psi)] = E_{21}(\alpha_{21}),$$

d. h. die geometrische Summe von $J_{21}u$ und $3J_{21}v$ gibt die Spannung E_{21} in der Zentrale, was auch dem Diagramm (Fig. 35) entspricht.

Alle bisherigen Betrachtungen und Formeln behalten ihre Giltigkeit, wenn in den Zuleitungen oder im Netze irgendwelche bekannten EMK., z. B. gegenelektromotorische Kräfte der Motoren, eingeschaltet sind. Ist z. B. in der Phase 2—1 eine bekannte Gegen-EMK. ε_{21} eingeschaltet, so haben wir in den Gleichungen (1), (6), (15) unter E_{21} nicht mehr die Klemmenspannung 2—1 in der Zentrale, sondern die Differenz derselben und ε_{21} zu verstehen, was aus der Bildung der obengenannten Gleichungen unmittelbar folgt.

Drittes Kapitel.

Gemischte Schaltung.

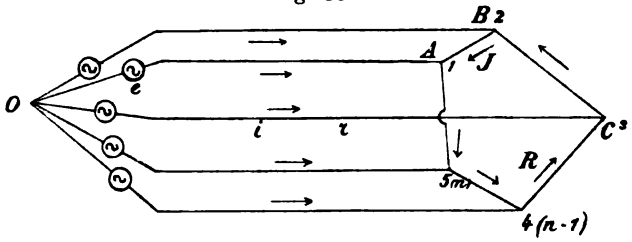
Wir wollen noch eine Schaltung untersuchen, welche einigermassen der im vorigen Kapitel untersuchten gegenüber steht. Es seien nämlich jetzt die Widerstände r grösser als R, so dass der Hauptverbrauch der Energie sich in den ersteren vollzieht. Wir können uns diese Schaltung als eine Sternschaltung der Apparate denken, bei welcher die Enden der einzelnen Phasenleiter mittels Widerstände R miteinander verbunden sind. Diese Widerstände seien klein, aber nicht zu vernachlässigen, und sie bilden einen Ausgleichskreis der Phasenströme. Nähern sich sämtliche R dem Werte Null, so bekommen wir schliesslich aus deren Kreise einen gewöhnlichen Knotenpunkt der Sternschaltung.

Digitized by Google

Diese Anordnung hat vielleicht wenig praktisches Interesse, sie bietet uns aber Gelegenheit, noch einige Methoden der Lösung anzuwenden, welche auch in anderen Fällen nützlich sein können.

Da es sich hier wie früher darum handelt, aus den gegebenen Widerständen, Selbstinduktionen, Kapazitäten und Vektoren der EMK. die Ströme zu finden, so scheint es dem ersten Anblick nach, dass die genaue Lösung der Aufgabe schon durch die Gleichungen (1), (6) und (15) des zweiten Kapitels gegeben ist, da es bei der Aufstellung derselben gar nicht auf die Grössenordnung der Widerstände r und R

Fig. 36.



ankam, und die Schaltungen der Fig. 19 und 36 sonst ganz identisch sind. Wenn wir aber die Lösung der Gleichungen (1) des vorigen Kapitels näher betrachten [die Gleichungen (6) und (15) haben ähnliche Form der Lösung, nur werden einzelne Glieder geometrisch addiert], so sehen wir, dass die Form der Lösung selbst nur dann für Berechnungen bequem ist, wenn die einzelnen Glieder der Reihe nach abnehmende Grössen haben. Das ist der Fall, wenn sämtliche $r < R$ sind; sind dagegen $r > R$, so ist das letzte Glied in den Ausdrücken für A_1, (E_{21}) u. s. w. das grösste, und man müsste die Glieder, wie z. B.

$$\left(\frac{r_2\, r_3 \ldots r_{n-1}}{B\, C_1 \ldots D_1}\right)^2 \cdot \frac{1}{E}$$

auswerten, die keine bequeme Berechnung gestatten.

Ausserdem geben die Gleichungen (1), (6) und (15) die Grössen der Ströme J in den Widerständen R, während jetzt hauptsächlich die Ströme in den Widerständen r, wo die Hauptmenge der Energie verbraucht wird, in Betracht kommen. Nähern sich die Widerstände R dem Werthe Null, so werden die Ströme J, welche in denselben fliessen, ganz unbestimmt, während die Ströme i sich dabei einem bestimmten Grenzwerte nähern.

Wir können auch nicht in der ersten Annäherung die Wider-

Digitized by Google

stände R in den Gleichungen (1) gleich Null setzen, wie wir es früher mit r gethan haben; denn erstens bekommen wir dabei wieder n Gleichungen, die nur zusammen gelöst werden können, und zweitens verlieren diese Gleichungen überhaupt jeden physikalischen Sinn bei $R = 0$. Aus allen diesen Gründen müssen für den vorliegenden Fall neue Gleichungen aufgestellt werden.

1. Selbstinduktion ist nicht vorhanden.

Da wir mit einer verallgemeinerten Sternschaltung zu thun haben, so liegt der Gedanke nahe, die im ersten Kapitel angewendete Methode hier zu benützen. Dort haben wir die Aufgabe auf die Aufsuchung der Spannung a zwischen den Punkten A und B (Fig. 1) zurückgeführt. Dementsprechend bezeichnen wir hier die Spannungen zwischen den Punkten O—A, O—B u. s. w. (Fig. 36) mit a_1 a_2, ... [1]). Dann haben wir:

$$\left.\begin{aligned} \frac{e_1 - a_1}{r_1} &= i_1 \\ \frac{e_2 - a_2}{r_2} &= i_2 \\ \cdots\cdots\cdots & \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

alles natürlich geometrisch verstanden. Unter e sind dabei die Phasenspannungen und nicht die Klemmenspannungen wie im zweiten Kapitel zu verstehen. Da für den Punkt O

$$\Sigma i = 0,$$

so haben wir:

$$\Sigma \frac{e - a}{r} = 0 \quad \text{oder} \quad \Sigma \frac{e}{r} = \Sigma \frac{a}{r}.$$

$\Sigma \frac{e}{r} = \Sigma j = J$ ist die Resultante der fiktiven Ströme $j = \frac{e}{r}$; diese Resultante haben wir schon im ersten Kapitel benützt. Wir sehen, dass die Spannungen a der Bedingung

$$\Sigma \frac{a}{r} = J \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

unterworfen sind.

Kennen wir sämtliche a, so bestimmen wir leicht die Ströme i aus (1). Die Spannungen a sind von den Strömen J und den Wider-

[1]) Um jede Verwechslung zu vermeiden, denke man sich diese Spannungen als die Angaben eines Voltmeters, welches der Reihe nach an den Punkten O — A, O — B u. s. w. angelegt ist.

Digitized by Google

ständen R abhängig. Sind diese Spannungen für zwei benachbarte Knotenpunkte $= a_n$ und a_{n-1}, so ist für den entsprechenden Leiter $R_{n(n-1)}$

$$J_{n(n-1)} R_{n(n-1)} = a_n - a_{n-1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

da die Differenz zweier benachbarter a offenbar die Spannungsdifferenz an den Enden des Leiters R ist. Sämtliche R bilden einen geschlossenen Kreis, folglich

$$\Sigma R J = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Die Gleichungen (2), (3) und (4) lassen sich einfach graphisch deuten. Es sei a b c d e (Fig. 37) das Polygon der Ströme i (geschlossen, da $\Sigma i = 0$ ist). Wie man aus der Fig. 36 oder aus den Gleichungen (5) des zweiten Kapitels sieht, ist jedes i die Differenz zweier benachbarter J; es muss folglich ein solcher Punkt O (Fig. 37)

Fig. 37.

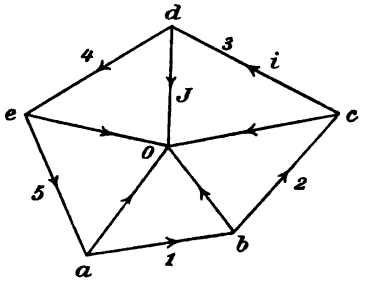
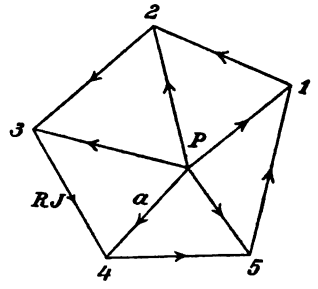


Fig. 38.



existieren, welcher mit den Eckpunkten des Polygons a b c d e verbunden, die Strahlen O a, O b u. s. w. gibt, die den Strömen J gleich sind; jede Seite des Polygons ist dabei gleich der geometrischen Differenz zweier Strahlen. Wir nehmen zuerst an, die Lage des Punktes O sei uns bekannt. Wie dieselbe zu finden ist, wird weiter gezeigt.

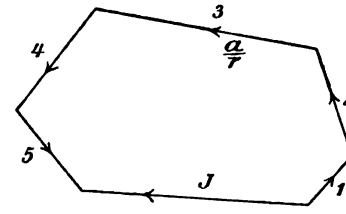
Nach der Gleichung (4) soll das Polygon mit den Seiten R J ein geschlossenes sein. Wir multiplizieren die eben gefundenen Strahlen J mit den entsprechenden R und konstruieren das Polygon der Fig. 38. Da der Punkt O nach der Voraussetzung richtig gewählt wurde, so ist dieses Polygon wirklich ein geschlossenes.

Wir wählen einen Punkt P innerhalb oder ausserhalb diesen Polygons (Fig. 38) und ziehen daraus die Strahlen zu den Eckpunkten desselben. Aus der Gleichung (3) folgt, dass diese Strahlen die Spannungen a darstellen, da jede Polygonseite die geometrische Differenz

Digitized by Google

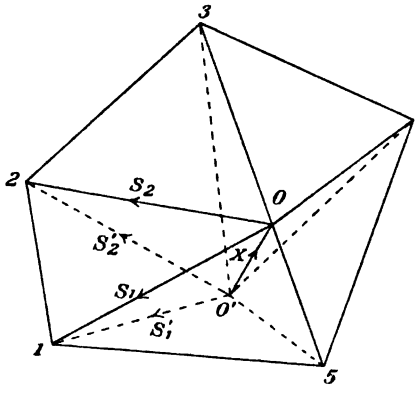
zweier a ist[1]). Wir dividieren jetzt jedes a durch das entsprechende r und konstruieren das Polygon der Vektoren $\frac{a}{r}$ (Fig. 39). Nach der Gleichung (2) ist dieses Polygon kein geschlossenes; vielmehr ist seine Resultante gleich J, wenn der Punkt P richtig gewählt wurde. Sind wir im stande, die drei obigen Polygone zu konstruieren, so ist unsere Aufgabe gelöst. Dabei müssen wir aber zwei Punkte finden (O und P), welche in Bezug auf diese Polygone gewissen geometrischen Bedingungen genügen. Wir geben nun eine Methode zur Bestimmung dieser Punkte.

Fig. 39.



Es sei ein geschlossenes Polygon gegeben und es wird ein Punkt O gesucht (Fig. 40), so, dass die aus diesem Punkte gezogenen Strahlen S mit den gegebenen Zahlen n_1, n_2 ... multipliziert, ein neues Polygon ABCDEF (Fig. 41) geben, dessen Schlusslinie ein gegebener Vektor T sei. Wir nehmen zuerst einen beliebigen Punkt O′, ziehen die entsprechenden Strahlen S′, multiplizieren dieselben mit den gegebenen Zahlen n_1, n_2 ... und konstruieren das Polygon A′B′C′D′E′F, dessen Schlusslinie T′ sei. Der Abstand OO′ zwischen dem angenommenen und gesuchten Punkte sei x. Können wir den Vektor x bestimmen, so ist damit der Uebergang von einem beliebigen zu dem richtigen Punkte gegeben.

Fig. 40.



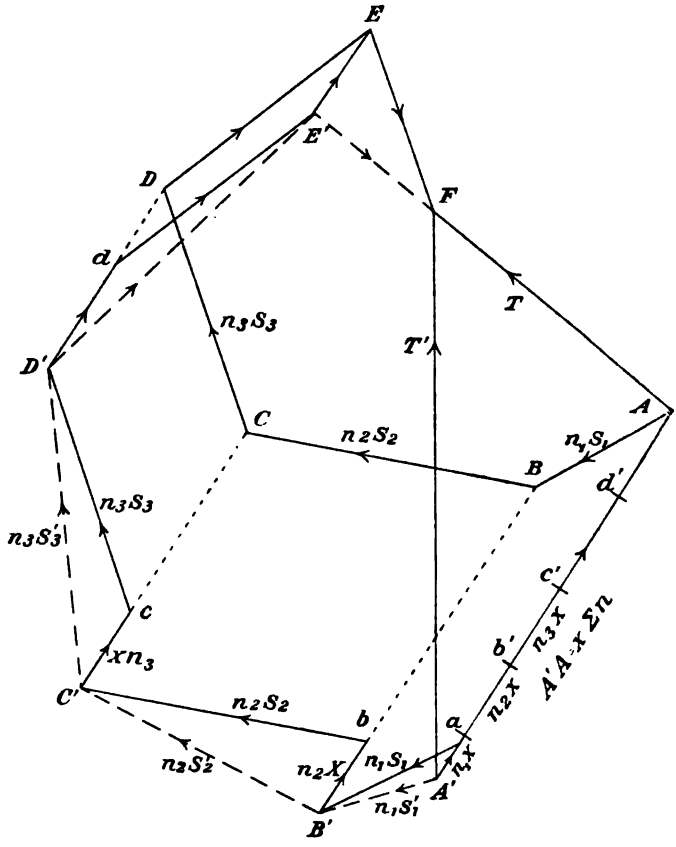
Aus Fig. 40 folgt, dass jeder Strahl S′ gleich der geometrischen Summe von x und dem entsprechenden Strahle S ist; wir können folglich jede Seite nS′ im Polygon A′B′C′D′E′F durch zwei Vek-

[1]) Man bemerke, dass im Polygon Fig. 37 die Richtungspfeile der Strahlen nach innen, in demjenigen der Fig. 38 nach aussen angedeutet sind. Das entspricht den Stromrichtungen in Fig. 36. Für die Richtigkeit der Konstruktion ist unbedingt nötig, dass die Pfeile in beiden Polygonen entgegengesetzt gerichtet sind; dies ist bei der Konstruktion zu beachten.

Digitized by Google

toren nx und nS ersetzen, und so bekommen wir das Polygon A′aB′bC′cD′dE′EF, dessen Schlusslinie wiederum T′ ist. Die Resultante T′ ist unabhängig von der Ordnung, in welcher die einzelnen Glieder nx und nS addiert werden. Wir können z. B. zuerst alle nx und dann sämtliche nS zusammenaddieren. Die Summe von nx gibt den Vektor $x\Sigma n$ in der Richtung von x; derselbe ist in Fig. 41 mit

Fig. 41.



A′A bezeichnet. Die Summe ΣnS gibt das Polygon ABCDEF, so dass wir wieder einen Linienzug zwischen den Punkten A′ und F haben. Die Schlusslinie des Polygons ABCDEF ist der gegebene Vektor AF = T. Wir sehen aus der Figur, dass die Grösse $A'A = x\Sigma n$ die geometrische Differenz von T′ und T ist; das gibt uns den Weg zur Lösung unserer Aufgabe. Wir wählen einen ganz willkürlichen

Digitized by Google

Punkt O′, konstruieren das demselben entsprechende Polygon (Strahlenpolygon), und ziehen von der Schlusslinie T′ dieses Polygons den gegebenen Vektor T geometrisch ab. Die Differenz gibt die Grösse $A'A = x\Sigma n$, welche, durch die bekannte Zahl Σn dividiert, die Grösse und die Richtung des Abstandes x zwischen dem angenommenen Punkte O′ und den gesuchten O gibt.

Bei der Konstruktion der Fig. 37 bis 39 werden nicht nur die Lagen der Punkte O und P, sondern auch die entsprechenden Strahlenpolygone selbst gesucht: die Fig. 38 ist das Strahlenpolygon der Fig. 37 und die Fig. 39 dasjenige der Fig. 38. Nachdem wir die richtige Lage des Punktes O gefunden haben, ist es nicht mehr nötig, das richtige Polygon wieder durch das Abgreifen der Strahlen S und Multiplizieren derselben mit n zu finden. Das geschieht viel einfacher. Die Eckpunkte der Polygone A′B′C′D′E′F und ABCDEF liegen auf den parallelen Geraden A′A, B′B u. s. w., deren Längen uns bekannt sind. Diese sämtlichen Geraden sind zu einander und zu der Geraden A′A parallel, weil AB gleich und parallel zu aB′, BC gleich und parallel zu b′C ist u. s. w. Haben wir die Linie AA′ gefunden, so ziehen wir aus allen Eckpunkten des Polygons A′B′C′D′E′F die zu dieser Linie parallelen Geraden, teilen die Strecke AA′ in die den Koëffizienten n proportionalen Teile A′a, ab′, b′c′ ... und tragen auf den gezogenen Parallelen die Strecken B′B = aA; C′C = b′A; D′D = c′A u. s. w. auf. Das gibt uns das Polygon der richtigen Strahlen nS. Sind nicht die Strahlen S selbst gesucht, sondern ist nur das Strahlenpolygon verlangt, so brauchen wir den Punkt O gar nicht zu finden. Die Strecke AA′ gibt uns nämlich die Möglichkeit, dieses Polygon unmittelbar aus dem Polygon A′B′C′D′E′F abzuleiten, wie es eben gezeigt wurde.

Die Konstruktion vereinfacht sich, wenn T = O ist, d. h. wenn das Polygon ΣnS ein geschlossenes sein soll, wie es z. B. bei Gleichung (4) der Fall ist. Dabei fällt x in die Richtung von T′ und ist gleich $x = \frac{T'}{\Sigma n}$.

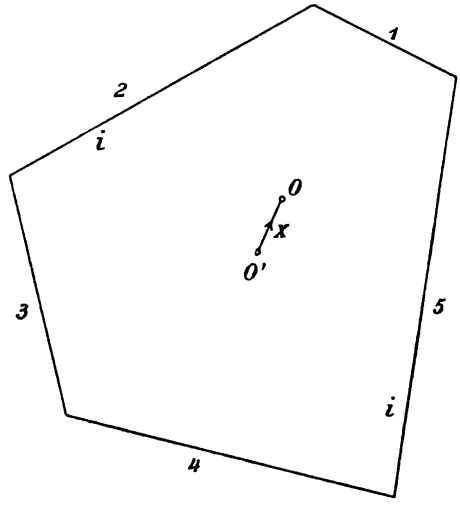
Folgendes Beispiel möge die Konstruktion noch erläutern. Es seien die Ströme i in den Leitern r eines fünfphasigen Systems graphisch in der Form eines geschlossenen Fünfecks (Fig. 42) gegeben. Die Widerstände R sind gleich 6, 2, 4, 3, 5 Ohm. Es wird verlangt, die Ströme J in diesen Widerständen zu finden.

Wir wissen aus Fig. 37 und 38, dass die Ströme J gleich den Strahlen des Polygons der Ströme i aus einem bestimmten Punkte O

Digitized by Google

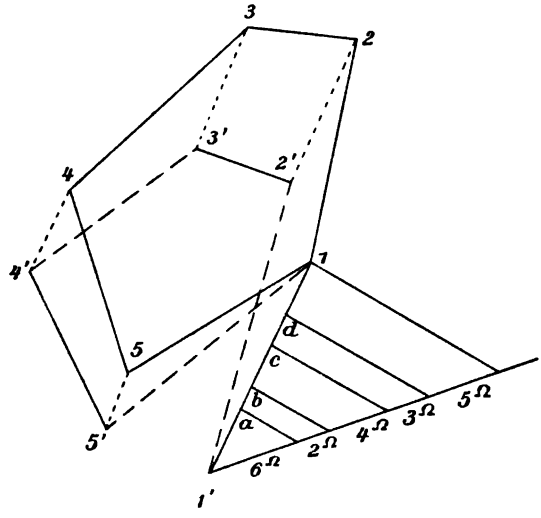
sind; dieser Punkt wird durch die Bedingung bestimmt, dass das Polygon der Spannungen RJ ein geschlossenes ist ($\Sigma RJ = 0$). Die Strahlen S

Fig. 42.



sind also in diesem Falle die Ströme J und die Koëffizienten n nichts anderes, als die Widerstände R, oder ihnen proportionale Grössen. Wir

Fig. 43.



nehmen einen beliebigen Punkt O', messen die Strahlen daraus in einem beliebigen Massstabe, multiplizieren dieselben mit den ent-

Digitized by Google

sprechenden R und konstruieren das Fünfeck 1′2′3′4′5′1 (Fig. 43) auch in einem beliebigen Massstabe. Die Schlusslinie 1′1 ist in diesem Massstabe $= 15{,}2$; $\Sigma n = \Sigma R = 20$; folglich $x = \frac{15{,}2}{20} = 0{,}76$. Diese Grösse tragen wir vom Punkte O′ zu der Geraden 11′ parallel auf und finden den gesuchten Punkt O. Die Strahlen aus diesem Punkte sind gleich den Strömen J in demselben Massstabe, in welchem die Seiten des Polygons die Ströme i darstellen. Wird es verlangt, auch das Polygon ΣRJ aufzuzeichnen, so teilen wir die Strecke 11′ in fünf den Widerständen R proportionale Teile, ziehen aus den Eckpunkten des Polygons 1′2′3′4′5′1 Parallele zu 11′ und verschieben diese Eckpunkte um die Längen 5′5 = 1d; 4′4 = 1c; 3′3 = 1b . . ., wie es in Fig. 41 erläutert wurde. Auf diese Weise bekommen wir das dem Punkte O entsprechende geschlossene Fünfeck 123451, ohne dabei nötig zu haben, den Punkt O selbst vorher zu bestimmen. Man kann sich leicht durch die Messung überzeugen, dass die Seiten dieses Polygons wirklich parallel zu den Strahlen J aus O und proportional den Grössen RJ sind. Es sei darauf hingewiesen, dass die Ströme i allein die Ströme J noch nicht bestimmen; es müssen die Widerstände R auch bekannt sein. Umgekehrt genügen die Ströme J vollständig zur Bestimmung von i, da jedes i die Differenz zweier benachbarter J ist. Man kann das auch so aussprechen: bestimmten Strahlen entspricht nur ein Polygon, welches die Endpunkte dieser Strahlen verbindet, während einem Polygon unendlich viele Strahlenbündel entsprechen, wenn dieselben keiner weiteren Bedingung unterworfen sind.

Fig. 44.

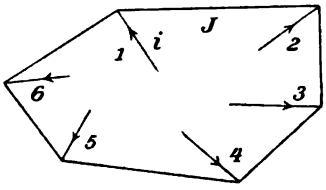
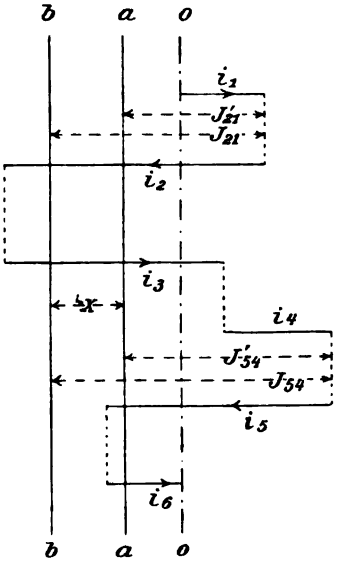


Fig. 45.



Die eben beschriebene Methode zur Bestimmung der Ströme J vereinfacht sich für Gleichstrom wie folgt: Es sei 1234561 (Fig. 44) ein geschlossenes Leitersystem, an welches die stromzuführenden Leitungen 1, 2 . . . angeschlossen sind. Die Ströme i in diesen Leitungen

Digitized by Google

seien gegeben und die Bedingung $\Sigma i = 0$ erfüllt; gesucht sind die Ströme J im geschlossenen Leitersystem. Die gegebenen Ströme i können wir graphisch in der Form eines Linienzuges (Fig. 45) darstellen, dessen Enden an einer Achse O O liegen ($\Sigma i = 0$). Wir ziehen eine beliebige Gerade a a parallel zu O O; die Ordinaten des Linienzuges in Bezug auf diese Gerade können wir als die Ströme J betrachten, da die Bedingungen $i_2 = J_{32} - J_{21}$, $i_3 = J_{43} - J_{32}$ ... durch diese Annahme erfüllt sind. Die Aufgabe ist aber unbestimmt, da die Gerade a a ganz beliebig ist.

Für das geschlossene Leitersystem muss aber noch die Bedingung $\Sigma R J = 0$, oder allgemein $\Sigma R J = \Sigma e$ (wenn in diesen Leitern noch EMK. e eingeschaltet sind) erfüllt werden. Es sei b b die richtige Gerade im Abstande x von a a; die Ordinaten in Bezug auf a a seien J', die wirklichen Ströme oder die Ordinaten in Bezug auf b b seien J; dann haben wir:

$$\Sigma R J = \Sigma R (J' + x) = \Sigma e,$$

oder

$$\Sigma J' R + x \Sigma R = \Sigma e,$$

woraus

$$x = \frac{\Sigma e - \Sigma J' R}{\Sigma R} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

Sind keine e vorhanden, so ist

$$x = - \frac{\Sigma J' R}{\Sigma R} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (5')$$

d. h. ein ähnliches Resultat wie für Wechselstrom.

Es genügt folglich, eine ganz beliebige Gerade a a zu ziehen und dann nach der Formel (5) bezw. (5') den Abstand der richtigen Geraden b b, die die Ströme J bestimmt, von diesen Geraden zu finden.

Nach dieser Abweichung kehren wir wieder zu unserer Konstruktion (Fig. 37 bis 39) zurück. Wenn die Widerstände R genügend klein sind, so führt uns wie früher der Weg der allmählichen Annäherungen am schnellsten zum Ziele. Wir setzen zuerst sämtliche R gleich Null, folglich auch

$$a_1 = a_2 = a_3 = \ldots = a_0,$$

so dass wir einfache Sternschaltung bekommen; unter dieser Voraussetzung finden wir nach den Regeln des ersten Kapitels die Spannung a_0 zwischen den beiden Sternpunkten, und die Ströme $i_0 = \frac{e - a_0}{r}$, die in der ersten Annäherung die wirklichen Ströme i unseren Systems

Digitized by Google

darstellen. Es ist uns somit das Polygon der Fig. 37 bekannt. Danach finden wir die Polygone RJ und $\frac{a}{r}$, da wir jetzt die Methode zur Bestimmung der Punkte O und P kennen gelernt haben. Ziehen wir die Vektoren (Korrektionen) $\frac{a}{r}$ von den fiktiven Strömen $\frac{e}{r}$ ab, so bekommen wir die Ströme i in der zweiten Annäherung [Gleichung (1)]. Genügt diese Annäherung noch nicht, so benützen wir die neuen Ströme i wieder zur Konstruktion von JR und $\frac{a}{r}$ u. s. w.

Das Verfahren lässt sich noch folgendermassen vereinfachen. Wir setzen (geometrisch)

$$a_1 = a_0 + a'_1$$
$$a_2 = a_0 + a'_2$$
$$\cdots\cdots\cdots$$

wo a_0 derjenige Wert ist, welchen sämtliche a annehmen, wenn alle $R = 0$ sind (s. o.). Die Gleichung (2) nimmt jetzt die Form

$$J = \Sigma \frac{a}{r} = \Sigma \frac{a_0 + a'}{r} = a_0 \Sigma \frac{1}{r} + \Sigma \frac{a'}{r}$$

an. Da aber im ersten Kapitel bewiesen wurde, dass

$$J = \Sigma \frac{e}{r} = a_0 \Sigma \frac{1}{r},$$

so bekommen wir einfach

$$\Sigma \frac{a'}{r} = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

d. h. das Vieleck der Fig. 39 wird auch ein geschlossenes, wenn wir nicht die Spannungen a, sondern a' suchen; das bringt eine Vereinfachung der Konstruktion mit sich. Dabei müssen wir aber die Grössen $\frac{a'}{r}$ nicht von den fiktiven Strömen $\frac{e}{r}$, sondern von den Strömen i_0 der ersten Annäherung abziehen, denn aus der Gleichung (1) haben wir für irgend welche Phase:

$$i = \frac{e - a}{r} = \frac{e - a_0 - a'}{r} = \frac{e - a_0}{r} - \frac{a'}{r} = i_0 - \frac{a'}{r} \quad . \quad (7)$$

d. h. um die wirklichen Ströme i zu bekommen, sind die Korrektionsströme $\frac{a'}{r}$ von den Strömen i_0 abzuziehen. Dabei bekommen wir die

Digitized by Google

Grössen i in der zweiten Annäherung, konstruieren nötigenfalls wieder die entsprechenden RJ und $\frac{a'}{r}$, ziehen aber die neuen Korrektionen $\frac{a'}{r}$ nicht von den Strömen i, sondern wieder von den früheren i_0 ab, wie es aus der Gleichung (7) folgt. Die neuen Annäherungen von i werden für die Konstruktion von $\frac{a'}{r}$ benützt, diese $\frac{a'}{r}$ werden aber immer von denselben Vektoren $i_0 = \frac{e - a_0}{r}$ abgezogen.

Ein Beispiel möge die Methode klarer machen. Wir nehmen die Daten des Beispiels 5 des ersten Kapitels (Fig. 9 und 10), nur dass noch ein Viereck der Widerstände $R = 4^{\Omega}$, 6^{Ω}, 3^{Ω} und 5^{Ω} die Enden von r verbindet (Fig. 46). Die Ströme i in der ersten Annäherung, d. h. für den Fall, dass sämtliche $R = 0$ wären, sind schon in Fig. 9 konstruiert und bilden das geschlossene Viereck ABCD in Fig. 46a. Im Innern dieses Vierecks nehmen wir einen beliebigen Punkt O und konstruieren nach den bekannten Regeln die Vierecke RJ und $\frac{a'}{r}$ (I und II); die Grössen J und a' selbst brauchen wir nicht zu wissen. Jetzt müssen $\frac{a'}{r}$ von den entsprechenden i_0 abgezogen werden. Dazu ziehen wir die Diagonalen des Vierecks II aus dem Punkte F und verschieben die Eckpunkte des Vierecks ABCD um die diesen Diagonalen gleichen und parallelen Strecken. Dabei ist zu beachten, dass das Viereck II in 10mal grösserem Massstabe als ABCD gezeichnet ist, da die Korrektionsströme klein sind. Das Viereck AB′C′D′ stellt die Ströme i in der zweiten Annäherung dar. Aus diesen können wir wieder das Viereck der Spannungen RJ konstruieren, das ist aber im vorliegenden Falle nicht nötig, da die Spannungen RJ in der zweiten Annäherung, wenn man diese Konstruktion ausführt, sich nur um einige Prozente von den ersten Annäherungswerten unterscheiden; diese Spannungen treten nachher nur als Korrektionsglieder in die Ströme i ein, und ein Fehler von einigen Prozenten in den Grössen $\frac{a'}{r}$ verursacht in den Grössen i einen Fehler von vielleicht nur einigen Zehnteln Prozent.

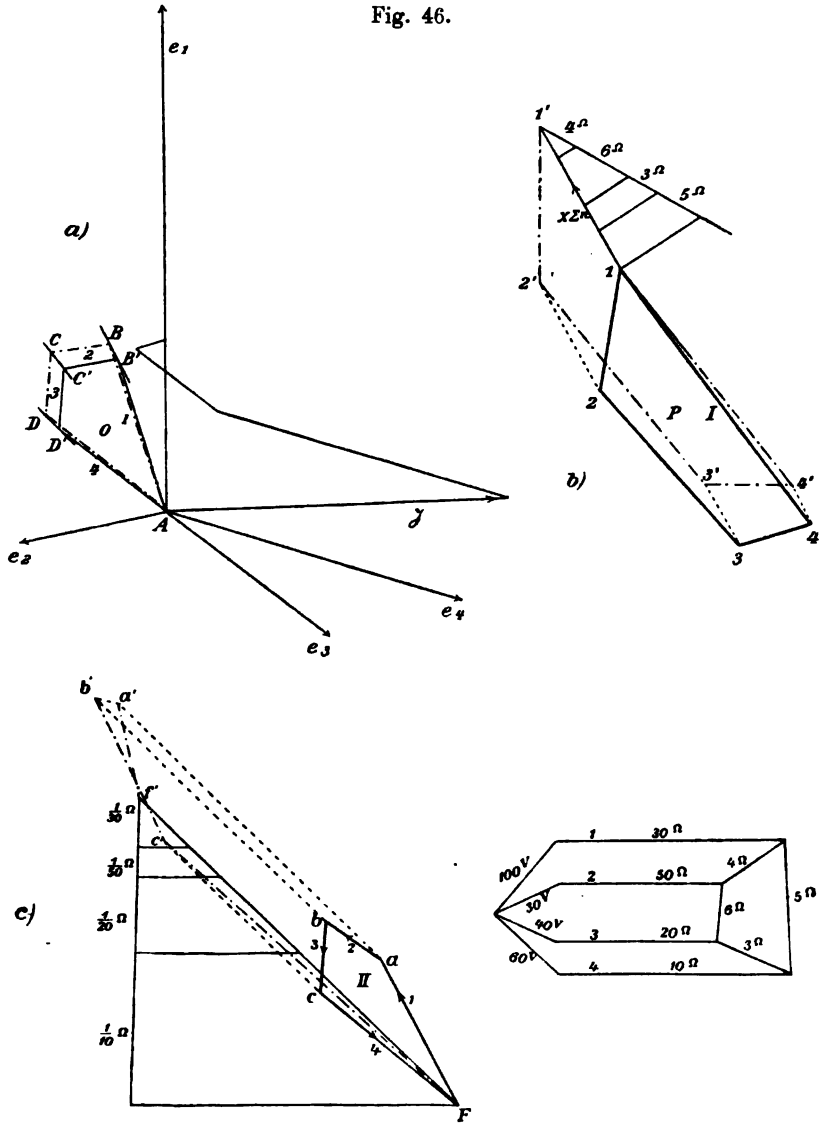
Werden nicht nur die Ströme i, sondern auch J gesucht, so konstruieren wir das Viereck I in der zweiten Annäherung, um die

Digitized by Google

richtige Lage des Punktes O innerhalb des Polygons A B C D zu finden.

Es sei nebenbei bemerkt, dass der Vektor x hier nicht von A'

Fig. 46.



nach A (Fig. 41), sondern umgekehrt gerichtet ist, da die Strahlen J nach innen gerichtet sind (Fig. 37).

Sind die Widerstände R nicht klein gegenüber r, so führt die

Digitized by Google

direkte Lösung schneller zum Ziele, als die Methode der Annäherungen. Bei den Stromrichtungen in Fig. 36 haben wir:

$$i_1 = J_{1n} - J_{21} \quad \text{und} \quad \begin{cases} R_{21} J_{21} = a_2 - a_1 \\ R_{1n} J_{1n} = a_1 - a_n \end{cases}$$

folglich

$$i_1 = a_1 \left(\frac{1}{R_{1n}} + \frac{1}{R_{21}} \right) - \frac{a_n}{R_{1n}} - \frac{a_2}{R_{21}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8')$$

was mit der Gleichung (1)

$$i_1 = \frac{e_1 - a_1}{r_1}$$

kombiniert, gibt:

$$a_1 \left(\frac{1}{R_{1n}} + \frac{1}{R_{21}} + \frac{1}{r_1} \right) - \frac{a_n}{R_{1n}} - \frac{a_2}{R_{21}} = \frac{e_1}{r_1} \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

Für die n Phasen können n Gleichungen von der Form (8) aufgestellt und daraus die Unbekannten a bestimmt werden[1]). Dann können wir aus den Gleichungen (1) die Ströme i ermitteln, und die Aufgabe ist damit gelöst. Vergleichen wir die Gleichungen (8) mit den Gleichungen (1) des zweiten Kapitels, so sehen wir, dass beide algebraisch identische Form und folglich auch dieselbe Lösung haben. Es war aber schon im zweiten Kapitel darauf hingewiesen, dass diese Form der Lösung nicht besonders bequem ist, da dabei viele Glieder geometrisch addiert werden müssen. Hier spielt dieser Uebelstand noch eine grössere Rolle, da alle Koëffizienten bei a in den Gleichungen (8) von derselben Grössenordnung sind; die Lösung besteht dabei nicht aus einem Hauptgliede und einer Reihe von Gliedern von abnehmender Grösse, sondern aus Gliedern von derselben Grössenordnung, die alle gleich genau berechnet, bezw. konstruiert werden müssen.

Deswegen scheint hier ein anderer, rein algebraischer Weg der Lösung ratsam, welcher schon im zweiten Kapitel erwähnt wurde. Jede der Gleichungen (8) bedeutet, dass die geometrische Summe $\frac{e_1}{r_1} + \frac{a_n}{R_{1n}} + \frac{a_2}{R_{21}}$ gleich dem Vektor $a_1 \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_{1n}} + \frac{1}{R_{21}} \right)$ ist. Was aber für Vektoren geometrisch gilt, gilt algebraisch für deren

[1]) Die Gleichungen (8) sind geometrisch zu verstehen; wir wissen aber aus dem zweiten Kapitel, dass, wenn keine Selbstinduktion vorhanden ist, solche Gleichungen algebraisch gelöst, und dann die Glieder der Lösung, welche e enthalten, geometrisch addiert werden können.

Digitized by Google

Projektionen auf jede beliebige Richtung. Bezeichnen wir die Projektionen von a auf eine beliebige Richtung p mit a_p und die Projektionen der fiktiven Ströme $j = \frac{e}{r}$ mit j_p, so haben wir algebraisch

$$A_1 (a_1)_p - \frac{(a_n)_p}{R_{1n}} - \frac{(a_2)_p}{R_{21}} = (j_1)_p \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

wo

$$A_1 = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{R_{1n}} + \frac{1}{R_{21}},$$

und ähnliche Gleichungen für die anderen Phasen. Diese Gleichungen können nach der gewöhnlichen Methode algebraisch gelöst und die Projektionen von a auf p bestimmt werden. Wir wählen jetzt eine andere Richtung q (z. B. senkrecht zu p), und lösen dieselben Gleichungen in Bezug auf diese Richtung, was uns die Projektionen a_q gibt. Aus a_p und a_q können a selbst konstruiert werden [1]).

Bei dieser Methode brauchen wir graphisch nur die Projektionen von j auf p und q und dann die Vektoren a aus den Projektionen a_p und a_q zu finden. Die Lösung selbst geschieht algebraisch. Die Methode gilt allgemein unabhängig von der relativen Grösse der Widerstände r und R und kann eventuell auch für die Lösung der Gleichungen (1) des zweiten Kapitels angewendet werden, wenn die Widerstände r dort so gross sind, dass die Methode der allmählichen Annäherungen nicht schnell genug zum Ziele führen würde. Das ist überhaupt die allgemeine Methode für die Schaltungen nach Fig. 19 und 36; sind $r < R$, so schreiben wir die Gleichungen (1) des vorigen Kapitels für die Ströme J; sind dagegen $r > R$, so schreiben wir die Gleichungen (8). Bei r und R von derselben Grössenordnung sind beide Wege gleich bequem.

Es ist nicht zu verkennen, dass man im allgemeinen bei der Lösung solcher komplizierterer praktischer Aufgaben die Methode der Annäherungen vorziehen wird, nämlich aus folgenden Gründen:

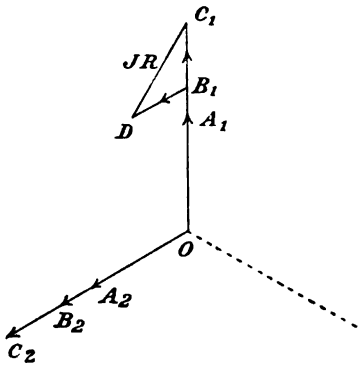
1. Man sieht schon aus der ersten Annäherung, ob es Zweck hat, weiter zu berechnen, oder es besser ist, einige von den gegebenen oder angenommenen Grössen, die öfters in gewissen Grenzen zu variieren sind, zu verändern. Bei der genauen Lösung weiss man das bis zum Schluss der langen Berechnungen nicht, und nachher können diese Berechnungen ganz umsonst sein.

[1]) Das ist eine Anwendung der geistreichen Steinmetzschen Methode der Lösung von Wechselstromproblemen mittels rechtwinkliger Koordinaten.

Digitized by Google

2. Bei der Methode der Annäherungen braucht man nur ganz einfache Formeln, die aus dem Sinne der Aufgabe unmittelbar abgeleitet werden können, anzuwenden; auch ist dabei die Wahrscheinlichkeit des Verrechnens vermindert, um so mehr, als sich nach der ersten Annäherung die Operationen in derselben Weise wiederholen.

Fig 47.



Für gewöhnliches Dreiphasensystem mit gleichmässiger Belastung können die Phasenströme i nach den vier verschiedenen Methoden erhalten werden.

1. Es seien OA_1, OA_2 ... die Ströme i (Fig. 47), OC_1, OC_2 ... die entsprechenden Spannungen e_0 in der Zentrale und OB_1, OB_2 ... die Spannungsabfälle in den Leitungen r. Die Strecken B_1C_1, B_2C_2 ... sind dann die Spannungen a. Die Differenz $\overline{B_1}\,\overline{C_1} - B_2\overline{C_2}$ gibt die Spannung an den Enden des Widerstandes R_{21}, d. h. $DC_1 = JR$. Da die Winkel DC_1B_1 und $DB_1C_1 = 30^0$ sind, so haben wir

$$B_1C_1 = B_2C_2 = \frac{JR}{\sqrt{3}},$$

und da

$$J = \frac{i}{\sqrt{3}},$$

so ist

$$B_1C_1 = B_2B_2 = \frac{iR}{3};$$

folglich

$$OC_1 = OB_1 + B_1C_1 = ir + \frac{iR}{3} = e_0,$$

woraus

$$i = \frac{e_0}{r + \frac{R}{3}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (10)$$

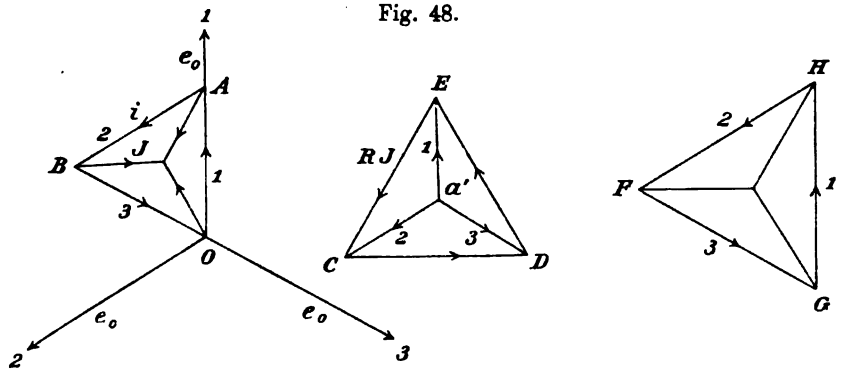
Wir haben von vornherein vorausgesetzt, dass die Ströme i in gleicher Phase mit e_0 sind. Der Winkel DC_1B_1 ist aber nur bei dieser Annahme gleich 30^0, wie es bekanntlich sein muss, weil die Ströme J um 30^0 gegen i verschoben sind.

Digitized by Google

2. Wir können die Formel (10) unmittelbar aus der Formel (2) des zweiten Kapitels ableiten. Dort haben wir gehabt $J = \frac{E_0}{R + 3r}$, aber $E_0 = e_0\sqrt{3}$ und $J = \frac{i}{\sqrt{3}}$, woraus $i = \frac{e_0}{r + \frac{R}{3}}$.

3. Nach der Methode der allmählichen Annäherungen finden wir als die erste Annäherung $i_0 = \frac{e_0}{r}$, weil $J = 0$ und $a_0 = 0$. Das Dreieck O A B (Fig. 48) stelle die Ströme i_0 dar. Die Strahlen $J = \frac{i}{\sqrt{3}}$ dieses Dreiecks sind mit Pfeilen nach innen versehen, wie es früher erläutert wurde. Das Dreieck C D E hat die Seiten $RJ = \frac{Ri_0}{\sqrt{3}}$ und die Strahlen a' dieses Dreiecks $= a' = \frac{RJ}{\sqrt{3}} = \frac{Ri_0}{3}$. Das Dreieck F G H hat die Seiten $\frac{a'}{r} = \frac{R}{3r} i_0$; dieselben sind, wie man aus Fig. 48 sieht, denjenigen des Dreiecks O A B parallel und müssen folglich ein-

Fig. 48.



fach algebraisch abgezogen werden, so dass in der zweiten Annäherung

$$i'' = i_0 - \frac{R}{3r} i_0.$$

Das Dreieck der Ströme i'' hat ähnliche Lage wie O A B, folglich sind die aus den Strömen i'' konstruierten Korrektionsglieder $= \frac{R}{3r} i''$. Früher wurde schon darauf aufmerksam gemacht, dass

Digitized by Google

diese Korrektionen immer von den ursprünglichen Strömen i_0 abzuziehen sind, wie es aus der Gleichung (7) folgt, d. h. in der dritten Annäherung

$$i''' = i_0 - \frac{R}{3r} i'' = i_0 \left[1 - \frac{R}{3r} + \left(\frac{R}{3r}\right)^2\right],$$

und ähnlich die k-te Annäherung.

$$i^{(k)} = i_0 \left[1 - \frac{R}{3r} + \left(\frac{R}{3r}\right)^2 - \ldots \pm \left(\frac{R}{3r}\right)^{k-1}\right]$$

$$= i_0 \frac{1 + \left(\frac{R}{3r}\right)^k}{1 + \frac{R}{3r}}.$$

Den genauen Wert von i bekommen wir nach den unendlich vielen Annäherungen, d. h. bei $k = \infty$. Da aber der obige Ausdruck nur für $\frac{R}{3r} < 1$ Bedeutung hat, so ist $\left(\frac{R}{3r}\right)^k_{k=\infty} = 0$ und

$$i = \frac{i_0}{1 + \frac{R}{3r}} = \frac{e_0}{r} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R}{3r}} = \frac{e_0}{r + \frac{R}{3}},$$

d. h. wieder die Gleichung (10).

Der Vergleich der Ausdrücke für i'' und i''' zeigt, dass, wenn wir i'' als den richtigen Wert für i annehmen, wir dabei einen Fehler von etwa $\left(\frac{R}{3r}\right)^2$ zulassen. Sind die Widerstände $R = 10\,\%$ von den Widerständen r, so macht das etwa 0,1 % aus, dagegen bei $r = R$ macht das schon ungefähr 10 % aus, und hier muss noch der Wert i''' genommen werden. Man kann natürlich bei gleichmässiger Belastung i einfach nach genauer Formel (10) berechnen; wir haben die Grössen der Fehler nur deshalb angegeben, weil dieselben auch bei ungleichmässiger Belastung und nahen $\frac{R}{r}$ von derselben Grössenordnung sind.

4. Die Formel (10) lässt sich noch unmittelbar aus der Gleichung (8) ableiten, ohne dabei nötig zu haben, Projektionen von a zu finden. Der Symmetrie wegen sind die drei a einander gleich und um 120° gegeneinander verschoben, d. h.

$$a_1 + a_2 + a_3 = 0$$

und folglich

$$\frac{a_3}{R} + \frac{a_2}{R} = -\frac{a_1}{R}.$$

Digitized by Google

Die Gleichung (8) gibt dabei

$$a_1 \left(\frac{3}{R} + \frac{1}{r}\right) = \frac{e_0}{r}.$$

Setzen wir daraus den Wert von a_1 in die Gleichung

$$i_1 = \frac{(e_0)_1 - a_1}{r}$$

ein, so bekommen wir wieder (10).

2. Selbstinduktion oder Kapazität ist in den Leitern r vorhanden.

Wie man voraussehen kann, werden die Formeln für diesen Fall denjenigen für den Fall ohne Selbstinduktion analog, nur treten anstatt der Ohmschen die scheinbaren Widerstände ein. Da dabei manche Vektoren um gewisse Winkel verschoben werden müssen, so können wir die abgekürzte Schreibweise, bei welcher wir algebraische Formeln schreiben und sie geometrisch verstehen, nicht mehr benützen; wir müssen wieder die symbolische Schreibweise des entsprechenden Paragraphs im zweiten Kapitel anwenden.

Es seien wieder v die scheinbaren Widerstände der Leiter r und ψ die Phasenverschiebungen, so dass $\cos \psi = \frac{r}{v}$. Die Gleichungen (1) nehmen jetzt die Form

$$i(\xi + \psi) = \frac{e(\alpha) - a(\beta)}{v} \quad \ldots\ldots \quad (11)$$

an; für jede Phase gibt es eine solche Gleichung. Dieselben bedeuten, dass der Spannungsabfall $e(\alpha) - a(\beta)$ im Leiter r, durch den scheinbaren Widerstand v desselben dividiert, den entsprechenden Strom i gibt, aber nicht in seiner richtigen Lage, sondern um den Winkel ψ verschoben, da die Spannung dem Strome voreilt. Aus (11) folgt

$$i(\xi) = \frac{e(\alpha - \psi) - a(\beta - \psi)}{v} \quad \ldots\ldots \quad (12)$$

auf Grund des im zweiten Kapitel bewiesenen Theorems (8) und (9).

Da $\Sigma i(\xi) = 0$, so ist

$$\Sigma \frac{e(\alpha - \psi)}{v} = \Sigma \frac{a(\beta - \psi)}{v}.$$

Die Grössen $\frac{e(\alpha - \psi)}{v}$ sind die fiktiven Ströme j, wie wir dieselben

Digitized by Google

im ersten Kapitel für den Fall mit Selbstinduktion konstruiert haben; dort haben wir die Spannungen e um die Winkel ψ im Sinne der Nacheilung verschoben und durch die entsprechenden v dividiert (siehe Fig. 12). Daraus folgt, dass $\Sigma \frac{e(\alpha - \psi)}{v} = \Sigma j = J$, und wir bekommen

$$J(\xi_j) = \Sigma \frac{a(\beta - \psi)}{v} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (13)$$

Dieser Gleichung entspricht die Gleichung (2) für den Fall ohne Selbstinduktion. Wir können auch hier die Vektoren a' einführen, indem wir setzen:

$$a(\beta) = a_0(\beta_0) + a'(\beta'),$$

so dass

$$J(\xi_j) = a_0 \Sigma \frac{(\beta_0 - \psi)}{v} + \Sigma \frac{a'(\beta' - \psi)}{v}.$$

Der Ausdruck $\Sigma \frac{(\beta_0 - \psi)}{v}$ ist $= \frac{(\beta_0 - \psi_0)}{V}$, und mit Rücksicht auf Fig. 15 und die entsprechenden Erläuterungen zur Konstruktion des Vektors J im ersten Kapitel sehen wir leicht, dass

$$J(\xi_j) = a_0 \frac{(\beta_0 - \psi_0)}{V}$$

und folglich

$$\Sigma \frac{a'(\beta' - \psi)}{v} = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (14)$$

Diese Gleichung entspricht der Gleichung (6).

Die Vektoren a' in die Gleichungen (12) eingeführt geben:

$$i(\xi) = \frac{e(\alpha - \psi) - a_0(\beta_0 - \psi)}{v} - \frac{a'(\beta' - \psi)}{v}.$$

Vergleichen wir den Ausdruck

$$\frac{e(\alpha - \psi) - a_0(\beta_0 - \psi)}{v}$$

mit der Gleichung (12a) des zweiten Kapitels, so sehen wir, dass derselbe dem Strome i_0 gleich ist, d. h. dem Strome i für den Fall, dass sämtliche $R = 0$. Folglich

$$i(\xi) = i_0(\xi_0) - \frac{a'(\beta' - \psi)}{v} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (15)$$

was der Gleichung (7) entspricht. Wir sehen, dass analog wie vorher die Ströme $\frac{a'}{r}$ von den Strömen i_0 abzuziehen sind, um die wirklichen

Digitized by Google

Ströme i zu bekommen; hier fallen aber diese Ströme nicht in die Richtungen der entsprechenden a′, sondern sie eilen denselben um die Winkel ψ nach.

Der Gang der Konstruktion ist also der folgende: Man setzt zuerst alle $R = 0$ und findet nach der im ersten Kapitel angegebenen Methode das Polygon der Ströme i_0 (siehe z. B. Fig. 17), die man für die Ströme i in der ersten Annäherung annimmt. Das Polygon der Spannungen RJ wird daraus ebenso, wie im Falle ohne Selbstinduktion, konstruiert, da die Beziehungen

$$\overline{i}_1 = \overline{J}_{1n} - \overline{J}_{21}$$

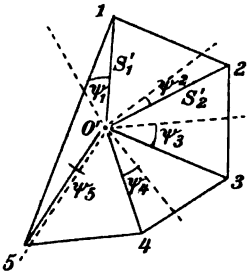
und

$$\Sigma R \overline{J} = 0$$

auch in diesem Falle gelten. Dann wird das Polygon der Ströme $\frac{a'}{v}$ konstruiert, und diese Ströme werden von i_0 abgezogen. Das gibt die Ströme i in der zweiten Annäherung; die Konstruktion kann nötigenfalls wiederholt werden; dabei werden aber jedesmal die neuen $\frac{a'}{v}$ von den ursprünglichen i_0 abgezogen.

Wir müssen nur noch eine Methode für die Konstruktion der Ströme $\frac{a'}{v}$ angeben, da die frühere für die Ströme $\frac{a'}{r}$ voraussetzte, dass dieselben die Richtungen der Spannungen a′, d. h. der Strahlen des Polygons RJ haben. Jetzt sind die Ströme $\frac{a'}{v}$ um verschiedene Winkel ψ gegen die Strahlen a′ verschoben, und die Konstruktion der Fig. 41 muss entsprechend verallgemeinert werden.

Fig. 49.



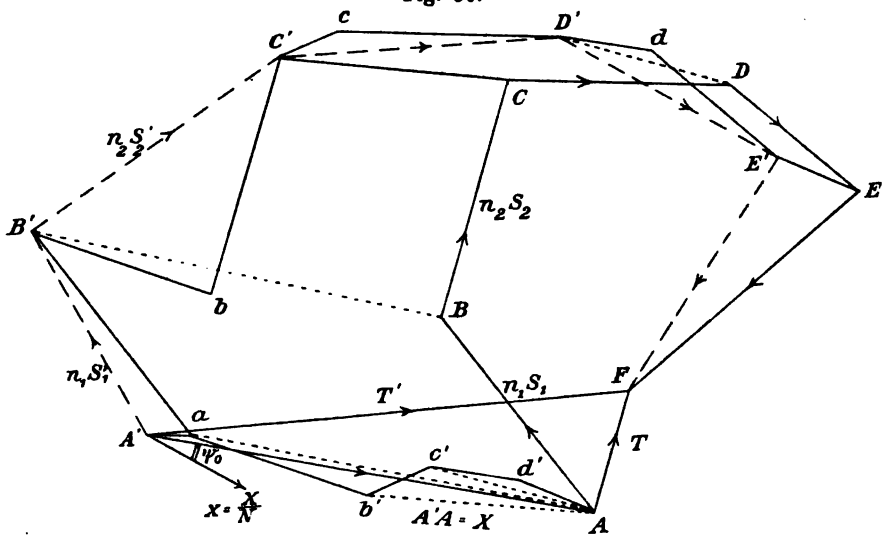
Die Aufgabe ist jetzt die folgende: Es ist ein Polygon (Fig. 49) gegeben und es wird verlangt, einen solchen Punkt O zu finden, dass die Strahlen S, mit den gegebenen Zahlen n multipliziert und um die gegebenen Winkel ψ verschoben, ein Polygon geben, dessen Resultante ein gegebener Vektor T sein soll.

Wir nehmen wieder zuerst einen beliebigen Punkt O′, ziehen die Strahlen S′, multiplizieren sie mit n, verschieben um die Winkel ψ und bekommen in dieser Weise das Polygon A′B′C′D′E′F (Fig. 50). Den Vektor, der den angenommenen Punkt O′ mit dem gesuchten O

Digitized by Google

verbindet, bezeichnen wir, wie vorher, mit x, und ersetzen in Fig. 50 jede Polygonseite n S′ durch ihre geometrischen Summanden n x und n S, so dass wir das Polygon A′ a B′ b C′ c ... bekommen. Die Vektoren n S sind dabei natürlich auch nebst den Vektoren n x und n S′ um die Winkel ψ verschoben. Wir ändern die Ordnung der Addition,

Fig. 50.



indem wir zuerst sämtliche n x und dann n S addieren. Die Resultante von n x ist A′A, und die Vektoren n S bilden das Polygon A B C D E F, dessen Schlusslinie gleich dem gegebenen Vektor T ist.

Wir bezeichnen den Vektor A′A mit X, seinen Phasenwinkel mit τ und denjenigen von x mit ξ, dann haben wir

$$X(\tau) = \Sigma n x (\xi - \psi) = x \Sigma n (\xi - \psi),$$

da X die Resultante der Vektoren n x ist, von welchen jeder aber um den entsprechenden Winkel ψ verschoben ist.

Es sei $N(\psi_0)$ die geometrische Summe von n, dann

$$\Sigma n (\xi - \psi) = N (\xi - \psi_0),$$
$$X(\tau) = x N (\xi - \psi_0),$$

woraus

$$x = \frac{X}{N}; \quad \xi = \tau + \psi_0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (16)$$

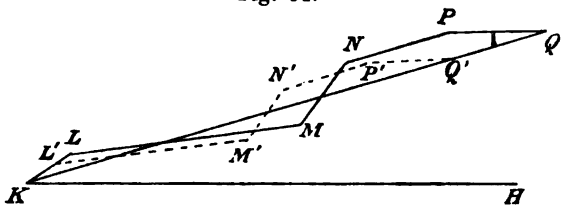
Die Konstruktion von N und ψ_0 ist in Fig. 51 dargestellt. Wir tragen unter den Winkeln ψ_1, ψ_2 ..., gegen eine Gerade K H geneigt, die

Digitized by Google

Strecken $KL = n_1$, $LM = n_2$ ... auf; dann ist die Schlusslinie $KQ = N$ und der Winkel $\psi_0 = \sphericalangle QKH$; die Konstruktion ist dieselbe wie in Fig. 15. Dividieren wir $X = A'A$ durch N und verschieben um den Winkel ψ_0 im Sinne der Voreilung, so bekommen wir den Vektor x (Fig. 50) und somit die Lage des gesuchten Punktes O.

Es ist hier, wie in Fig. 41, möglich, das richtige Polygon ABCDEF zu konstruieren, ohne die Lage von O und den Vektor x zu kennen. Nachdem das Polygon A'B'C'D'E'F für einen beliebigen Punkt O' konstruiert ist, zieht man von der Schlusslinie T' den gegebenen Vektor T ab und bekommt die Linie A'A. Dann konstruiert man separat die Grösse $KQ = N$ (Fig. 51) und verändert den Mass-

Fig. 51.



stab der Figur KLMNPQ so, dass man die ähnliche Figur KL'M'N'P'Q' mit der Schlusslinie $KQ' = A'A$ bekommt. Diese Figur wird in Fig. 50 übertragen, so, dass KQ' mit A'A zusammenfällt und wir das Polygon A'a b' c' d'A bekommen. Man zieht die Strahlen aA, b'A, c'A, d'A und die denselben gleichen und parallelen Linien $B'B = aA$, $C'C = b'A$ ..., die uns das gesuchte Polygon ABCDEF bestimmen. Die Grössen x, N, ψ_0 brauchen wir dabei gar nicht zu kennen. Muss das Polygon ABCDEF ein geschlossenes sein, so ist $T = 0$ und $X = A'A = T'$ zu setzen; im übrigen bleibt die Konstruktion dieselbe. Sind sämtliche $\psi = 0$, so bekommen wir offenbar wieder die Konstruktion der Fig. 41. Sind manche ψ negativ (Kapazität), so ist das entsprechend in Fig. 49 und 51 zu berücksichtigen.

Wie man aus der Gleichung (14) sieht, sind in unserem Falle die Koëffizienten n nichts anderes, als die reziproken Werte der Widerstände v, und deren Resultante ist $N = \frac{1}{V}$. Die Grösse V und folglich auch die Konstruktion der Fig. 51 müssen wir aber schon an und für sich bei der Bestimmung der Resultante J der fiktiven Ströme benützen (siehe den Fall mit Selbstinduktion im ersten Kapitel); folg-

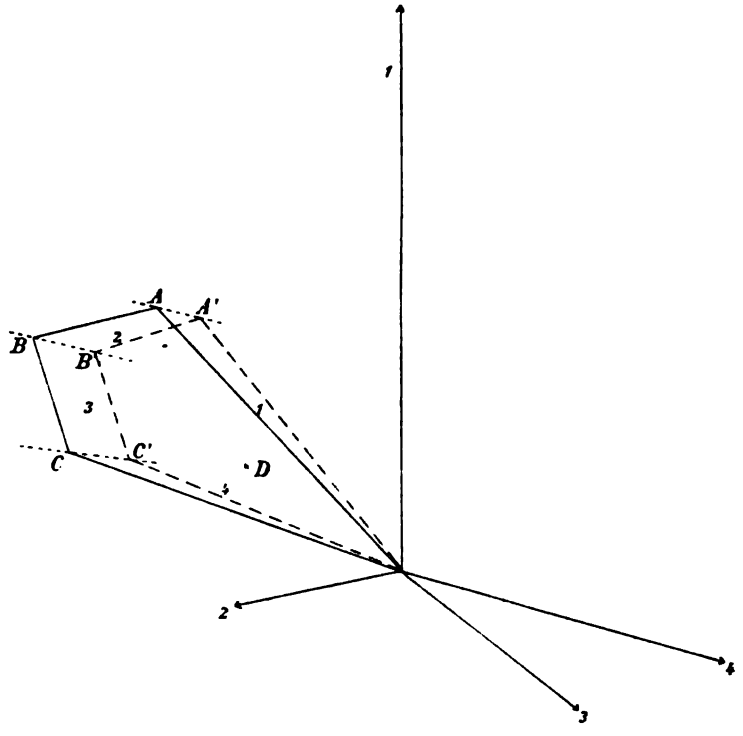
Digitized by Google

lich brauchen wir jetzt nur den Massstab der betreffenden Figur zu verändern, um das Polygon A′ a b′ c′ d′ A zu bekommen; eine besondere Konstruktion wie in Fig. 51 ist somit nicht nötig.

Als ein Beispiel nehmen wir die Daten der in Fig. 17 und 18 gelösten Aufgabe. Wir denken uns die Enden der dort gegebenen Leiter r durch die Widerstände $R = 3\,\Omega$, $7\,\Omega$, $4\,\Omega$, $8\,\Omega$ miteinander verbunden und wollen die Ströme i finden.

In der ersten Annäherung setzen wir alle $R = 0$; die Ströme i_0

Fig. 52.

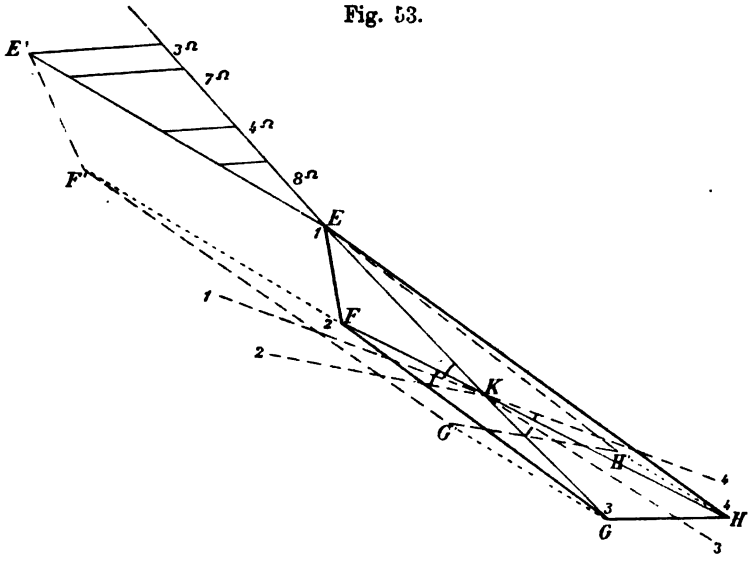


sind dabei die wirklichen Ströme in Fig. 17 (Viereck $O i_1 F K$). Wir übertragen dieselben in Fig. 52 (Viereck O A B C), nehmen einen beliebigen Punkt D und konstruieren dementsprechend das Polygon E′ F′ G′ H′ E (Fig. 53) der Spannungen R J, teilen die Schlusslinie in die den Widerständen R proportionalen Teile, verschieben in bekannter Weise die Eckpunkte des Polygons und bekommen das geschlossene Polygon E F G H der Spannungen R J. Jetzt wird in demselben ein beliebiger Punkt K gewählt und die Strahlen K E, K F . . . gezogen;

Digitized by Google

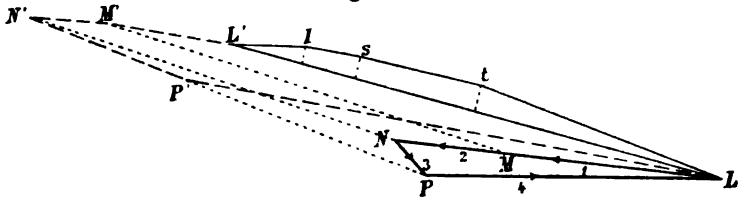
dieselben, um die Winkel ψ verschoben und mit $\frac{1}{v}$ multipliziert (wobei ψ und $\frac{1}{v}$ aus Fig. 18 bekannt sind), geben uns das Polygon L′M′N′P′L (Fig. 54); die verschobenen Richtungen der Strahlen sind in Fig. 53

Fig. 53.



mit K 1, K 2 . . . bezeichnet. Auf der Schlusslinie L′L zeichnen wir das Polygon L′IstL, welches demjenigen MIstP (Fig. 18) der Grössen $\frac{1}{v}$ ähnlich ist. Ziehen wir jetzt die Diagonalen tL, sL, IL und verschieben die Eckpunkte des Polygons L′M′N′P′L um die

Fig. 54.

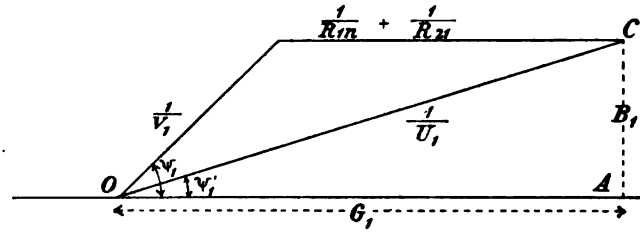


diesen Diagonalen gleichen und parallelen Strecken, so bekommen wir das gesuchte geschlossene Polygon LMNP der Korrektionsströme $\frac{a'}{v}$; dieselben, von den Strömen i_0 abgezogen (Fig. 52), geben das Polygon

Digitized by Google

$OA'B'C'$ der Ströme i in der zweiten Annäherung. Die Subtraktion der Grössen $\frac{a'}{v}$ geschieht am einfachsten in der Weise, dass wir die Punkte A, B, C um die den Strecken ML, NL, PL gleichen und parallelen Grössen verschieben; dabei ist aber zu beachten, dass das

Fig. 55.



Polygon LMNP gewöhnlich in grösserem Massstabe gezeichnet werden muss (in unserem Falle im fünffachen).

Die genaue Lösung des Problems ist die folgende: die Gleichung (8′) bleibt hier dieselbe:

$$i_1(\xi_1) = \left(\frac{1}{R_{1n}} + \frac{1}{R_{21}}\right) a_1(\beta_1) - \frac{1}{R_{1n}} a_n(\beta_n) - \frac{1}{R_{21}} a_2(\beta_2) \quad (17)$$

was, mit der Gleichung (12) kombiniert, gibt:

$$a_1\left[\left(\frac{1}{R_{1n}} + \frac{1}{R_{21}}\right)(\beta_1) + \frac{1}{v_1}(\beta_1 - \psi_1)\right] - \frac{1}{R_{1n}} a_n(\beta_n) - \frac{1}{R_{21}} a_2(\beta_2) = \frac{e_1}{v_1}(\alpha_1 - \psi_1).$$

Die geometrische Summe von $\left(\frac{1}{R_{1n}} + \frac{1}{R_{21}}\right)$ und $\frac{1}{v_1}$ bezeichnen wir mit $\frac{1}{U_1}$ (Fig. 55), so dass

$$\frac{1}{U_1} a_1(\beta_1 - \psi'_1) - \frac{1}{R_{21}} a_n(\beta_n) - \frac{1}{R_{21}} a_2(\beta_2) = \frac{e_1}{v_1}(\alpha_1 - \psi_1) \quad (18)$$

Es können n solche Gleichungen für n Phasen aufgestellt werden; sie können aber nicht unmittelbar zu den n algebraischen Gleichungen wie (9) zurückgeführt werden (weil die Winkel ψ'_1, ψ'_2 ... eintreten). Dazu müssen wir die Gleichungen etwas umformen. Wir haben

$$\frac{1}{u_1} a_1(\beta_1 - \psi'_1) = \frac{a_1}{u_1} \sin(mt + \beta_1 - \psi'_1) = \frac{\cos\psi'_1}{u_1} a_1 \sin(mt + \beta_1) - \frac{\sin\psi'_1}{u_1} a_1 \cos(mt + \beta_1).$$

Digitized by Google

In diesem Ausdruck bezeichnen wir (Fig. 55) $\frac{\cos \psi'_1}{U_1} = OA$ mit G_1 und $\frac{\sin \psi_1}{U_1} = AC$ mit B_1 [1]), die Projektionen von a_1 auf zwei beliebige, zu einander senkrechte Richtungen p und q mit $(a_1)_p$ und $(a_1)_q$, d. h.

$$a_1 \sin (mt + \beta_1) = (a_1)_p$$

und

$$a_1 \cos (mt + \beta_1) = (a_1)_q.$$

Dann bekommen wir aus (18):

$$G_1 (a_1)_p - B_1 (a_1)_q - \frac{1}{R_{1n}} (a_n)_p - \frac{1}{R_{21}} (a_2)_p = (j_1)_p \quad . \quad . \quad (19)$$

Es sind n solche Gleichungen für die Richtung p und ebenso viele für q vorhanden, so dass die 2n unbekannten Projektionen von a auf diese Richtungen bestimmt werden können. Da aber die Projektionen auf p und q in dieselben Gleichungen eintreten, so müssen die 2n Gleichungen (19) gleichzeitig gelöst werden, während für den Fall ohne Selbstinduktion [Gleichungen (9)] die n Gleichungen für jede Achse separat zu lösen sind [2]).

---

[1]) Steinmetz nennt den reziproken Wert eines scheinbaren Widerstandes Admittanz und seine Komponenten G_1 und B_1 Konduktanz bezw. Susceptanz.

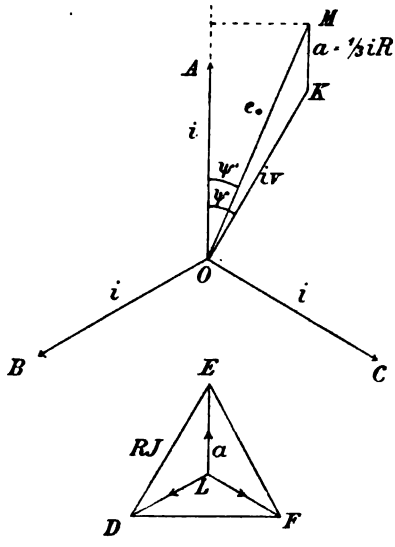
[2]) Das hat folgende physikalische Bedeutung: Es sei ein Leitersystem vorhanden, in welchem Gleichströme fliessen. Für ein solches System findet die sogenannte Uebereinanderlagerung der Gleichgewichtszustände statt: sind nämlich die EMK. e_1, e_2, e_3 ... eingeschaltet, so kann man zuerst die Ströme unter der Voraussetzung bestimmen, dass nur e_1 wirkt, dann nur e_2 u. s. w. Die wirklichen Ströme, welche entstehen, wenn sämtliche EMK. eingeschaltet sind, sind in jedem Leiter gleich der algebraischen Summe der vorher bestimmten Ströme. Dasselbe findet für Wechselstromkreise ohne Selbstinduktion und Kapazität statt, da die momentanen Gleichgewichtsbedingungen dieselben sind. Dabei bringt jede neue EMK. in den Vektoren der Ströme Aenderungen mit, welche gleich den Strömen sind, die unter der Wirkung dieser EMK. allein entstehen würden. In einem unmittelbaren Zusammenhang mit dieser Eigenschaft steht die folgende: die Projektionen der Ströme auf jede Richtung sind nur von den Projektionen der EMK. auf dieselbe Richtung abhängig. Aendern sich die EMK. so, dass ihre Projektionen auf irgend welche Richtung dieselben bleiben, so bleiben auch die Projektionen der Stromvektoren auf diese Richtung konstant. Wenn wir also sämtliche Vektoren der EMK. auf irgend welche Richtung projizieren, die den Kirchhoffschen Gesetzen entsprechenden Gleichungen bilden und dieselben algebraisch, wie für Gleichstrom, lösen, so finden wir die Projektionen der Stromvektoren auf die angenommene Richtung, ganz unabhängig davon, wie gross die Ströme selbst sind.

Beim Vorhandensein der Selbstinduktion und Kapazität findet weder die Uebereinanderlagerung der Gleichgewichtszustände, noch die eben besprochene

Digitized by Google

Dreiphasiges System, gleichmässige Belastung. Es seien OA, OB, OC (Fig. 56) die Ströme i und FD, DE, EF die gegen dieselben um 30° verschobenen Ströme $J = \frac{i}{\sqrt{3}}$, oder auch in einem anderen Massstabe die Spannungen $JR = \frac{iR}{\sqrt{3}}$. Da sämtliche a einander gleich sind, so sind sie gleich den Strahlen LD, LE, LF, d. h.

Fig. 56.



$$a = \frac{JR}{\sqrt{3}} = \frac{iR}{3} \quad . \quad . \quad (20)$$

Diese Strahlen sind, wie man aus der Figur sieht, zu den Strömen i parallel. Die Spannungen $e_0 = OM$ in der Zentrale sind gleich der geometrischen Summe von $OK = iv$ und $KM = a = \frac{iR}{3}$ [Gleichung (11)]. Man sieht leicht, dass die Konstruktion von e_0 dem Falle einer einfachen Sternschaltung mit den Phasenwiderständen $(r + \frac{1}{3}R)$ und denselben Induktanzen mL entspricht. Analytisch haben wir

$$e_0 = i\sqrt{(r + \tfrac{1}{3}R)^2 + m^2L^2}$$

$$\operatorname{tg}\psi' = \frac{mL}{r + \frac{1}{3}R}.$$

Das Resultat (20) folgt auch unmittelbar aus der Gleichung (17), wenn wir $a_n(\beta_n) + a_2(\beta_2) = -a_1(\beta_1)$ und sämtliche R einander gleich setzen.

Unabhängigkeit der Projektionen statt. Die Projektionen der Ströme sind von der Grösse und von der Lage der Spannungen und der Ströme selbst abhängig; dementsprechend müssen die Gleichungen der Projektionen auf irgend welche zwei Richtungen zusammen gelöst werden, wie wir es auch in unserem speziellen Falle der Gleichungen (19) gesehen haben.

Im bekannten Buche von Bedell und Crehore, „Theorie der Wechselströme" (deutsche Uebersetzung 1895, S. 223), ist eine Methode zur Behandlung der mehrphasigen Stromkreise in Sternschaltung angegeben. Diese Methode beruht auf der Addierung der Stromkomponenten, die von einzelnen Phasen-EMK. erzeugt werden; nach den vorhergehenden Erläuterungen soll diese Methode beim Vorhandensein von Selbstinduktion bezw. Kapazität zu verkehrten Resultaten führen.

Digitized by Google

3. Selbstinduktion oder Kapazität ist in sämtlichen Leitern vorhanden.

Der Uebergang vom vorhergehenden zu diesem Falle ist äusserst einfach. Wir bezeichnen, wie im zweiten Kapitel, die scheinbaren Widerstände der Leiter R mit u und die entsprechenden Phasenverschiebungen mit φ. Die Gleichung (4) nimmt jetzt die Gestalt

$$\Sigma J u (\eta + \varphi) = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (21)$$

an, was dem zweiten Kirchhoffschen Gesetze für das geschlossene Netz der Widerstände R entspricht. Die Strahlen J (Fig. 37) müssen dementsprechend der Bedingung genügen, dass sie, mit den entsprechenden u multipliziert und um die Winkel φ im Sinne der Voreilung verschoben, ein geschlossenes Polygon bilden. Wir wissen schon, wie man ein Strahlenpolygon unter solchen Bedingungen konstruiert (Fig. 50). Das Polygon $\frac{a'}{v}$ wird genau so, wie im vorigen Falle, konstruiert, die Korrektionen $\frac{a'}{v}$ von den Strömen i_0 abgezogen u. s. w.

Für die algebraische Lösung haben wir den Gleichungen (1) und (3) entsprechend:

$$\frac{e_1 (\alpha_1) - a_1 (\beta_1)}{v_1} = i_1 (\xi_1 + \psi_1) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (22)$$

$$u_{21} J_{21} (\eta_{21} + \varphi_{21}) = a_2 (\beta_2) - a_1 (\beta_1),$$
$$u_{1n} J_{1n} (\eta_{1n} + \varphi_{1n}) = a_1 (\beta_1) - a_n (\beta_n),$$

woraus

$$\frac{e_1 (\alpha_1 - \psi_1) - a_1 (\beta_1 - \psi_1)}{v_1} = i_1 (\xi_1),$$

$$J_{21} (\eta_{21}) = \frac{1}{u_{21}} [a_2 (\beta_2 - \varphi_{21}) - a_1 (\beta_1 - \varphi_{21})],$$

$$J_{1n} (\eta_{1n}) = \frac{1}{u_{1n}} [a_1 (\beta_1 - \varphi_{1n}) - a_n (\beta_n - \varphi_{1n})],$$

was mit Rücksicht auf die Gleichung

$$i_1 (\xi_1) = J_{1n} (\eta_{1n}) - J_{21} (\eta_{21})$$

ergibt

$$a_1 \left[\frac{1}{v_1} (\beta_1 - \psi_1) + \frac{1}{u_{1n}} (\beta_1 - \varphi_{1n}) + \frac{1}{u_{21}} (\beta_1 - \varphi_{21})\right]$$
$$- \frac{a_n}{u_{1n}} (\beta_n - \varphi_{1n}) - \frac{a_2}{u_{21}} (\beta_2 - \varphi_{21}) = \frac{e_1}{v_1} (\alpha_1 - \psi_1).$$

Digitized by Google

Bezeichnen wir die geometrische Summe von $\frac{1}{v_1}$, $\frac{1}{u_{1n}}$ und $\frac{1}{u_{21}}$ mit $\frac{1}{U_1}$ (Fig. 57), so bekommen wir:

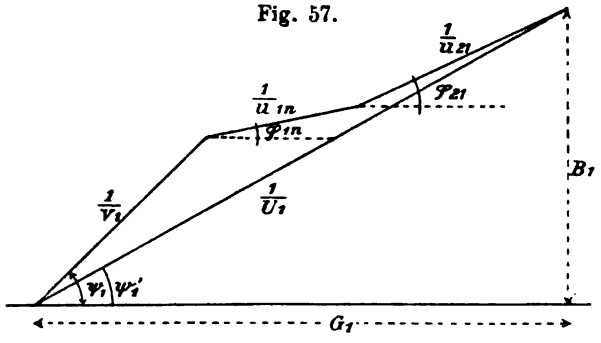
$$\frac{a_1}{U_1}(\beta_1 - \psi'_1) - \frac{a_n}{u_{1n}}(\beta_n - \varphi_{1n}) - \frac{a_2}{u_{21}}(\beta_2 - \varphi_{21}) = j_1(\alpha_1 - \phi_1),$$

oder, wenn wir zu den Projektionen übergehen und dementsprechend auch die Projektionen von $\frac{1}{u_{1n}}$ und $\frac{1}{u_{21}}$ einführen (Fig. 58), so bekommen wir:

$$G_1(a_1)_p - B_1(a_1)_q - g_{1n}(a_n)_p + b_{1n}(a_n)_q - g_{21}(a_2)_p + b_{21}(a_2)_q = (j_1)_p \quad (23)$$

Aus 2n solchen Gleichungen können die Projektionen von a bestimmt

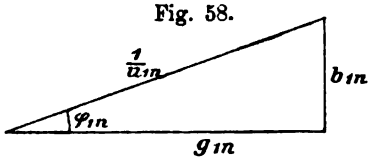
Fig. 57.



werden; alles über die Gleichungen (19) Gesagte gilt auch für diese Gleichungen. Kennen wir die Vektoren von a, so finden wir leicht i graphisch aus den Gleichungen (22).

Das Diagramm für den Fall einer gleichmässigen Belastung des Dreiphasensystems gestaltet sich folgendermassen: die Ströme i sind in Fig. 59 dargestellt; die Ströme J sind gegen dieselben um 30° verschoben (Fig. 60); die Spannungen u J sind gegen die Ströme J um den Winkel φ verschoben; folglich, wie man aus Fig. 60 sieht, sind die Spannungen a gegen die Ströme i auch um den Winkel φ verschoben und sind gleich $\frac{u J}{\sqrt{3}} = \frac{u i}{3}$.

Fig. 58.



Die Spannung e_0 finden wir als geometrische Summe von iv

Digitized by Google

Fig. 59.

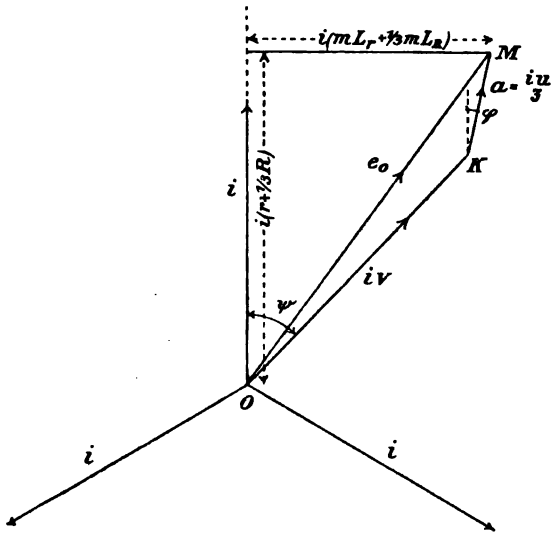
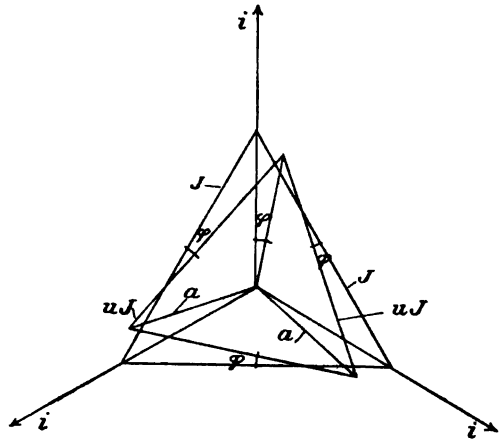


Fig. 60.



und a (Fig. 59). Man sieht, dass die Ströme i dieselben sind, wie bei einer einfachen Sternschaltung mit den Widerständen ($r + \frac{1}{3} R$) und den Induktanzen ($m L_r + \frac{1}{3} m L_R$).

4. Stromerzeuger in Netzschaltung.

Bis jetzt wurde überall vorausgesetzt, dass die EMK. e in Sternschaltung erzeugt werden und folglich, dass ein Sternpunkt in der

Digitized by Google

Zentrale existiert (Fig. 1 und 36), auf welchen wir die Spannungen a beziehen können. Sämtliche abgeleitete Formeln können aber auch auf den Fall angewendet werden, dass in der Stromerzeugungsquelle Netzschaltung und folglich kein Sternpunkt existiert; dazu brauchen wir nur anstatt gegebener neue gleichwertige Stromerzeuger in Sternschaltung einzuführen, bei welchen die verketteten Spannungen und folglich auch alle Verhältnisse im äusseren Stromkreise dieselben bleiben. Der Ersatz ist äusserst einfach. Die verketteten Spannungen eines Systems bilden immer ein geschlossenes Polygon; die Strahlen zu demselben aus jedem beliebigen Punkte können als Phasenspannungen eines gleichwertigen Systems angenommen werden, da die Differenz zweier benachbarter Strahlen immer gleich der entsprechenden verketteten Spannung ist. Wir sehen, dass es unendlich viele äquivalente Systeme gibt; das stimmt vollständig mit dem im ersten Kapitel bewiesenen Theorem über gleichwertige Systeme. Wir haben nämlich bewiesen, dass die entsprechenden Phasen-EMK. zweier gleichwertiger Systeme sich um einen und denselben Vektor voneinander unterscheiden müssen; das ist hier der Fall. Nehmen wir z. B. die Strahlen S′ aus dem Punkte O′ (Fig. 40) als die Phasenspannungen e an; die Strahlen S aus einem beliebigen Punkte O unterscheiden sich von S′ um einen und denselben Vektor O′O; folglich sind die beiden Systeme gleichwertig.

Viertes Kapitel.

Mehrphasige Leitersysteme im allgemeinen.

1. Allgemeine Gleichungen.

Nachdem wir in den vorigen Kapiteln die praktisch wichtigsten Schaltungen untersucht haben, wollen wir die Stromverteilung in einem ganz beliebigen mehrphasigen Leitersystem, mit den an beliebigen Stellen eingeschalteten EMK., finden.

Es empfiehlt sich auch hier, die Gleichungen zuerst für Gleichstrom aufzustellen, da sich die Gestalt derselben für mehrphasige

Digitized by Google

Ströme nachher schon voraussehen lässt. Sind alle Widerstände und EMK. bekannt, so kann man eine genügende Anzahl Gleichungen

$$\Sigma i = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

und

$$\Sigma i r = \Sigma e \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

bilden, aus welchen die Ströme i bestimmt werden können.

Das betrachtete System bestehe aus n Leitern und habe s Knotenpunkte; ausserdem bezeichne f die kleinste Anzahl von Leitern, die man fortnehmen muss, damit kein geschlossener Kreis mehr im Leitersystem vorhanden sei. Dann ist die Zahl der Gleichungen von der Form (2) gleich f; eine grössere Anzahl derselben kann nicht geschrieben werden, ohne dass dabei einige Gleichungen schon implicite in den anderen enthalten sind. Ebenso ist die Zahl der voneinander unabhängigen Gleichungen (1) nur $(s-1)$; die s-te Gleichung für den letzten Knotenpunkt kann aus diesen $(s-1)$ abgeleitet werden. Da wir nach dem Sinne der Aufgabe n Gleichungen haben müssen, so ist

$$f + (s-1) = n,$$

woraus

$$f = n - s + 1.$$

Hat z. B. ein Leitersystem 21 Leiter und 15 Knotenpunkte, so ist die Anzahl der Gleichungen (2)

$$f = 21 - 15 + 1 = 7.$$

Die übrigen 14 Gleichungen sind von der Form (1) [1]).

Die f Gleichungen (2) können auf verschiedene Weise gebildet werden, unter anderem so, dass man dieselben für die einzelnen kleinen Polygone b, c, d . . . des ganzen Systems (Fig. 61) anwendet, deren Anzahl, wie es sich leicht zeigen lässt, immer gleich f ist.

Für mehrphasige Wechselströme haben die Gleichungen (1) und (2) dieselbe Gestalt, wenn Selbstinduktion bezw. Kapazität nicht vorhanden sind; sie gelten dabei entweder algebraisch für Momentanwerte oder geometrisch für Effektivwerte. Im letzteren Falle entspricht jeder Gleichung ein geschlossenes Polygon der Ströme bezw. Spannungen im Vektordiagramm. Die graphisch-analytische Methode eignet sich hier am besten zur Lösung. Es seien e_1, e_2 . . . (Fig. 62) die gegebenen Vektoren der EMK. und O A B C D eines der eben ge-

[1]) Mascart und Joubert, Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus 2, p. 316.

Digitized by Google

nannten geschlossenen Polygone. Wir wählen zwei beliebige Koordinatenachsen O p und O q und bezeichnen die Projektionen der EMK. e und der unbekannten Vektoren i auf diese Achsen mit e_p, e_q und i_p, i_q. Dann haben wir für die p-Achse n algebraische Gleichungen:

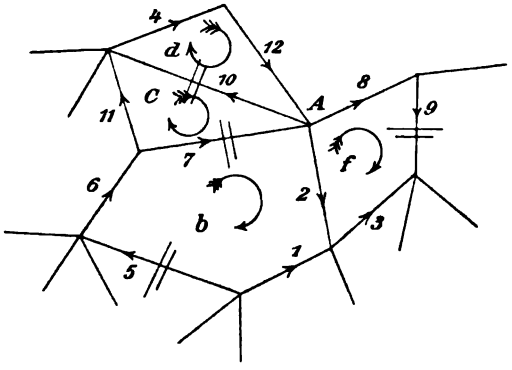
$$\Sigma i_p = 0; \quad \Sigma i_p r = \Sigma e_p;$$

woraus die n Projektionen i_p analytisch bestimmt werden können; die Projektionen e_p findet man dabei aus der Figur graphisch. Ebenso bestimmt man aus den analogen Gleichungen:

$$\Sigma i_q = 0; \quad \Sigma i_q r = \Sigma e_q;$$

die Projektionen i_q auf die Achse q. Aus i_p und i_q findet man die Vektoren i wieder graphisch, und die Aufgabe ist damit gelöst. Etwas

Fig. 61.



komplizierter stellt sich die Lösung beim Vorhandensein von Selbstinduktion und Kapazität. Der momentane Spannungsabfall ist beim Vorhandensein von Selbstinduktion nicht mehr i r, sondern $i r + L \frac{d i}{d t}$, oder bei sinusförmigen Strömen

$$i r \sin (m t + \xi) + m L i \cos (m t + \xi),$$

und dementsprechend (Fig. 63):

$$e_p = i_p r + i_q m L,$$
$$e_q = i_q r - i_p m L.$$

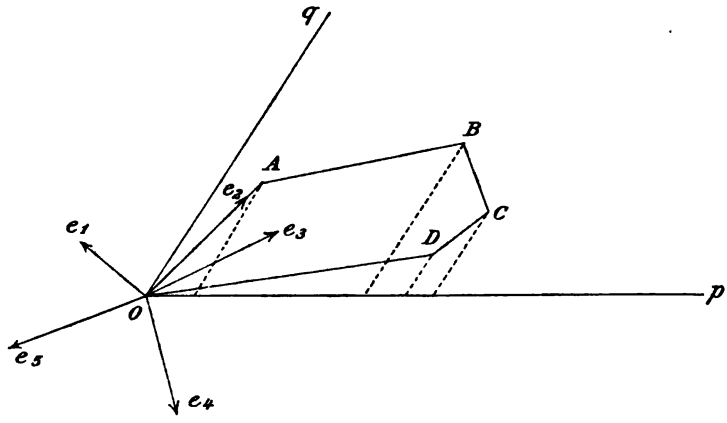
Wir haben folglich:

$$\Sigma i_p = 0; \quad \Sigma i_q = 0;$$
$$\Sigma i_p r + \Sigma i_q m L = \Sigma e_p;$$
$$\Sigma i_q r - \Sigma i_p m L = \Sigma e_q;$$

Digitized by Google

2n Gleichungen, aus welchen die Projektionen von n Vektoren i auf die Achsen p und q bestimmt werden können. Die Vektoren selbst konstruiere man wieder graphisch. Während man im Falle ohne Selbst-

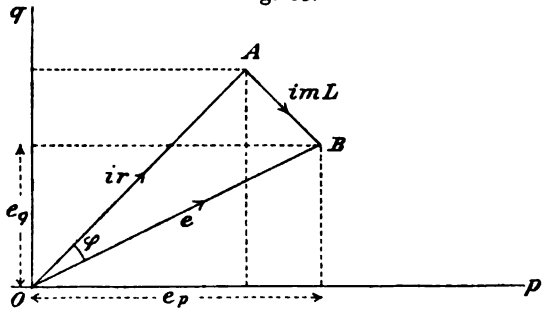
Fig. 62.



induktion die n Gleichungen für jede Achse getrennt zu lösen hat, müssen hier alle 2n Gleichungen zusammen gelöst werden.

Man beachte, dass in diesem Falle p und q senkrecht aufeinander stehen müssen und dass, wenn in den Gleichungen für die Achse p

Fig. 63.



die Glieder $m L i_q$ mit + genommen sind, dieselben in den Gleichungen für die Achse q das Vorzeichen — haben müssen [1]).

Die Zahl der zusammen zu lösenden 2n Gleichungen kann in speziellen Fällen reduziert werden, wenn die Anordnung der einzelnen

[1]) Diese letzte Bemerkung gilt natürlich auch für die Gleichungen (19) und (23) des dritten Kapitels.

Digitized by Google

Leiter mehr oder weniger regelmässig ist. Die Anzahl der Leiter ist, z. B. bei dem im dritten Kapitel untersuchten Schaltungsschema $2n$, wenn n die Anzahl der Phasen ist. Im allgemeinen Falle wären $4n$ Gleichungen notwendig; infolge einer Regelmässigkeit in der Anordnung ist dort diese Zahl auf die Hälfte reduziert [Gleichungen (19) und (23)].

2. Charakteristische Funktion.

Es lässt sich zeigen, dass für jedes Leitersystem eine solche Funktion existiert, aus welcher sämtliche Gleichungen (1) durch partielle Differentiation abgeleitet werden können. Eine solche Funktion sei die charakteristische Funktion eines Leitersystems genannt. Um ihren Ausdruck zu finden, ist es bequemer, in die Gleichungen (2) anstatt i andere Variablen einzuführen, nämlich die Spannungsdifferenzen zwischen den Enden einzelner Leiter. Diese Spannungsdifferenzen bezeichnen wir mit a. Wir haben

$$a = e - ri,$$

woraus

$$i = \frac{e - a}{r} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

so dass, wenn alle a bekannt sind, auch die Ströme i aus (3) bestimmt werden können. Die Gleichungen (2) nehmen jetzt einfach die Gestalt an:

$$\Sigma a = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

Die physikalische Bedeutung dieser Gleichungen ist klar: für jeden geschlossenen Kreis ist die Summe der Spannungen seiner einzelnen Teile gleich Null. Diese Gleichungen drücken somit die Bedingung aus, dass bestimmte Leiter zu einem und demselben Leitersystem gehören. Man kann beweisen, dass für Gleichstrom der Ausdruck für die Gesamtenergie des Systems gleichzeitig seine charakteristische Funktion ist. Die Gesamtenergie ist bekanntlich:

$$W = \Sigma i^2 r = \Sigma \frac{(e - a)^2}{r} \quad \ldots\ldots \quad (5)$$

Der Ausdruck Σ besteht aus n Gliedern; aber nicht alle n Spannungen a sind unabhängige Variablen: sie müssen gleichzeitig den Gleichungen (4) genügen, wenn sie einem bestimmten Leitersystem angehören sollen. Diese letzteren Gleichungen enthalten weder Widerstände, noch EMK. e oder Ströme i; sie zeigen bloss, welche Leiter

Digitized by Google

miteinander verbunden sind, und stellen sozusagen analytisch das Schaltungsschema dar. Ohne diese Gleichungen sind a ganz willkürliche Grössen, und Gleichung (5) hat keinen physikalischen Sinn. Bevor wir also die partiellen Differentialquotienten von W nach a nehmen und dieselben gleich Null setzen, müssen die f Spannungen a daraus mit Hilfe von (4) eliminiert werden, so dass wir W als Funktion der (n — f) unabhängigen Variablen a bekommen.

Diese Elimination kann in jedem speziellen Falle wirklich durchgeführt werden; um aber das allgemeine Theorem zu beweisen, sei dieselbe Methode der Elimination, wie bei der Bestimmung von Maxima und Minima mit Nebenbedingungen, angewandt. Man multipliziere jede der Gleichungen (4) mit einem beliebigen Faktor 2λ und addiere dieselben zu (5), so dass man erhält:

$$W' = \Sigma \frac{(e-a)^2}{r} + 2\Sigma(\lambda \Sigma a) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

In dieser Funktion W' kann man beim Differenzieren alle n Variablen a als unabhängige betrachten. Durch das partielle Differenzieren bekommt man n Gleichungen:

$$\frac{\partial W'}{\partial a_1} = 0; \quad \frac{\partial W'}{\partial a_2} = 0 \ \ldots \ \frac{\partial W'}{\partial a_n} = 0;$$

aus welchen die f Faktoren λ leicht eliminiert werden können, so dass schliesslich (n — f) Gleichungen bleiben. Diese letzteren sind mit denjenigen identisch, die man bekommen hätte, wenn man f Spannungen

$$a_1, a_2 \ldots a_f$$

aus (5) unmittelbar mit Hilfe von (4) eliminiert und dann

$$\frac{\partial W}{\partial a_{f+1}} = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial a_{f+2}} = 0 \ \ldots \ \frac{\partial W}{\partial a_n} = 0$$

gesetzt hätte.

Um nun die Eigenschaften der Gleichungen $\frac{\partial W'}{\partial a} = 0$ im allgemeinen Falle untersuchen zu können, müssen die in den Gleichungen (4) eintretenden a in einer bestimmten Reihenfolge geschrieben werden. Wie schon früher bemerkt wurde, ist es am einfachsten, diese Gleichungen der Reihe nach für die einzelnen Polygone b, c, d, f ... (Fig. 61) zu bilden. Dabei muss natürlich für jeden Leiter ein positives und ein negatives Ende angenommen werden, da zur Bestimmung der Grösse und Richtung des Stromes nicht nur allein die Spannungsdifferenz a zwischen den Enden eines Leiters, sondern auch die Angabe

Digitized by Google

notwendig ist, welches Ende des Leiters von höherem Potentiale ist. Die positiven und die negativen Enden der Leiter seien zunächst willkürlich angenommen; die ersteren sind in Fig. 61 mit Pfeilen angedeutet. Bei der Bildung der Gleichungen (4) addieren wir sämtliche a für einzelne Polygone im Sinne des Uhrzeigers. Die in dieser Weise gewonnenen Gleichungen (4) haben folgende Eigenschaften:

1. Alle a, die sich auf die an der Peripherie des Systems befindlichen Leiter (z. B. 8) beziehen, treten nur in je eine Gleichung ein.

2. Alle übrigen a treten in je zwei Gleichungen ein, nämlich in diejenigen, welche für zwei Polygone gebildet sind, zwischen welchen sich der betreffende Leiter befindet.

3. Ein und dasselbe a tritt in beide Gleichungen mit entgegengesetzten Vorzeichen ein.

Wir bekommen somit für einen Leiter an der Peripherie:

$$\frac{\partial W'}{\partial a_k} = -2\,\frac{e_k - a_k}{r_k} + 2\lambda_k = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7')$$

und für einen innerhalb des Netzes:

$$\frac{\partial W'}{\partial a_k} = -2\,\frac{e_k - a_k}{r_k} + 2\lambda_0 - 2\lambda_u = 0 \quad . \quad . \quad . \quad (7'')$$

wobei λ_0 und λ_u sich auf zwei Polygone beziehen, zwischen welchen sich der Leiter a_k befindet.

Eine nähere Betrachtung der Gleichungen (7') und (7'') zeigt, dass, wenn wir dieselben für alle sich in einem Knotenpunkte zusammentreffenden Leiter algebraisch addieren, wir einfach bekommen:

$$\Sigma\,\frac{e_k - a_k}{r_k} = \Sigma i = 0;$$

da alle λ sich gegenseitig aufheben.

Somit ist bewiesen, dass, wenn man die partiellen Differentialquotienten der Energiefunktion W gleich Null setzt, man ein System von Gleichungen bekommt, welche das erste Kirchhoffsche Gesetz für das ganze betreffende System ausdrücken. Folglich ist der Energieausdruck die vorher definierte charakteristische Funktion. Dabei ist vorausgesetzt, dass W nur durch unabhängige Variablen ausgedrückt ist, oder dass die entsprechenden Bedingungsgleichungen (4) in einer anderen Weise berücksichtigt sind.

Ein Beispiel zeigt das klarer. Wir haben (Fig. 61):

für das Polygon b: $a_7 + a_2 - a_1 + a_5 + a_6 = 0;$

„ „ „ c: $-a_{10} - a_7 + a_{11} = 0;$

Digitized by Google

für das Polygon d: $a_{12} + a_{10} + a_4 = 0;$
„ „ „ f: $-a_2 + a_8 + a_9 - a_3 = 0;$
u. s. w. u. s. w.

Die Gleichungen (7′) und (7″) lauten für die aus dem Punkte A ausgehenden Leiter, wenn wir $\frac{e_k - a_k}{r_k}$ mit i_k bezeichnen:

$$\begin{aligned} -i_2 + \lambda_a - \lambda_f &= 0; \\ -i_7 + \lambda_b - \lambda_c &= 0; \\ -i_{10} - \lambda_c + \lambda_d &= 0; \\ -i_{12} + \lambda_d &= 0; \\ -i_8 + \lambda_f &= 0. \end{aligned}$$

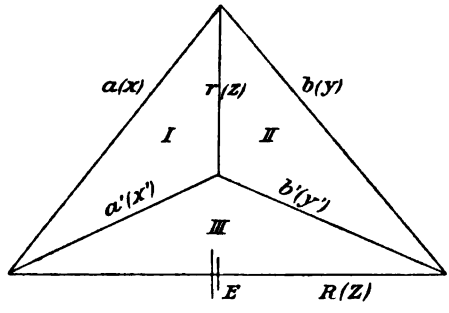
Wenn man in der zweiten und vierten dieser Gleichungen das Vorzeichen ändert und dann sie alle zusammenaddiert, so bekommt man:

$$-i_2 + i_7 - i_{10} + i_{12} - i_8 = 0.$$

Ein Blick in Fig. 61 zeigt, dass diese Gleichung der Gleichung (1) für den Punkt A vollständig entspricht.

Beispiel. Die Stromverteilung in der Wheatstoneschen Brücke zu finden, wenn die Widerstände noch nicht abgeglichen sind.

Fig. 64.



Es seien a, b, a′, b′, r, R die sechs Widerstände (Fig. 64), und x, y, x′, y′, z, Z die entsprechenden Spannungen zwischen den Enden der einzelnen Leiter. Der Energieausdruck ist:

$$W = \frac{x^2}{a} + \frac{x'^2}{a'} + \frac{y^2}{b} + \frac{y'^2}{b'} + \frac{z^2}{r} + \frac{(E-Z)^2}{R}.$$

Da das betrachtete System aus drei Polygonen besteht (mit I, II und III bezeichnet), so müssen drei Bedingungsgleichungen bestehen.

Digitized by Google

Als unabhängige Variablen wählen wir x, x′ und Z und bekommen somit:

$$\left.\begin{aligned} z &= x' - x \\ y &= Z - x \\ y' &= Z - x' \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (8)$$

Der Energieausdruck als Funktion der unabhängigen Variablen wird:

$$W = \frac{x^2}{a} + \frac{x'^2}{a'} + \frac{(Z-x)^2}{b} + \frac{(Z-x')^2}{b'} + \frac{(x'-x)^2}{r} + \frac{(E-Z)^2}{R};$$

woraus man leicht findet:

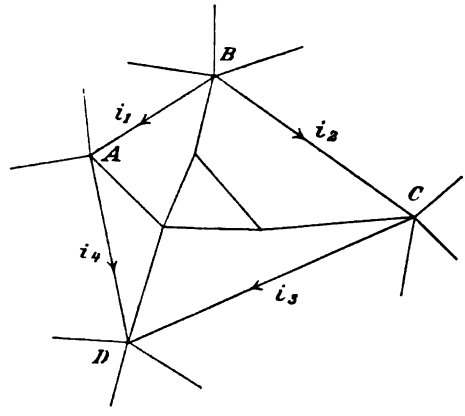
$$\tfrac{1}{2}\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{x}{a} - \frac{Z-x}{b} - \frac{x'-x}{r} = 0;$$

$$\tfrac{1}{2}\frac{\partial W}{\partial x'} = \frac{x'}{a} - \frac{Z-x'}{b'} + \frac{x'-x}{r} = 0;$$

$$\tfrac{1}{2}\frac{\partial W}{\partial Z} = \frac{Z-x}{b} + \frac{Z-x'}{b'} - \frac{E-Z}{R} = 0.$$

Diese drei Gleichungen enthalten nur drei Unbekannten x, x′, Z, welche also bestimmt werden können; die übrigen Spannungen werden aus (8) bestimmt; die Ströme sind gleich den entsprechenden Spannungen, durch die Widerstände der Leiter dividiert.

Fig. 65.



Es sei noch bemerkt, dass die aus der charakteristischen Funktion gewonnenen Gleichungen (1) nicht immer die dem ersten Kirchhoffschen Gesetze entsprechende gewöhnliche Form haben, sondern dasselbe auf andere Arten ausdrücken können. Zwei solche Formen

Digitized by Google

mögen erwähnt werden. Es seien z. B. J_A und J_B (Fig. 65) die Summe aller Ströme, die zum Punkte A bezw. B fliessen, mit Ausnahme von i_1. Dann ist

$$J_A + i_1 = 0;$$

ebenso

$$J_B - i_1 = 0;$$

so dass

$$J_A + J_B = 0;$$

Die Summe aller Ströme, welche zu den beiden Enden eines Leiters fliessen, ist stets gleich Null.

Wir betrachten jetzt das Polygon ABCD und bezeichnen die Summe der Ströme, die zu seinen Ecken fliessen, mit J_{14}, J_{34}, J_{23} . . ., dann haben wir:

$$\begin{aligned} J_{14} + i_1 - i_4 &= 0, \\ J_{34} + i_4 + i_3 &= 0, \\ J_{23} + i_2 - i_3 &= 0, \\ J_{12} - i_1 - i_2 &= 0, \end{aligned}$$

woraus

$$J_{14} + J_{34} + J_{23} + J_{12} = \Sigma J = 0.$$

Die Summe der Ströme, die zu den Ecken eines Leiterpolygons fliessen, ist stets gleich Null.

Bekommt man also aus der charakteristischen Funktion diesen Theoremen entsprechende Gleichungen, so sind dieselben mit den Gleichungen, die das erste Kirchhoffsche Gesetz in seiner gewöhnlichen Form ausdrücken, vollständig gleichbedeutend.

Jetzt kann man sich leicht überzeugen, dass auch für mehrphasige Systeme ohne Selbstinduktion und Kapazität der Energieausdruck gleichzeitig die charakteristische Funktion ist. Es seien sämtliche Spannungen als Vektoren dargestellt, und die Winkel, welche e und a mit einer Koordinatenachse p bilden, seien α bezw. β (wie im dritten Kapitel). Wir haben

$$\bar{i} = \frac{\bar{e} - \bar{a}}{r};$$

wobei

$$\bar{e} - a = \sqrt{a^2 + e^2 - 2ae\cos(\alpha - \beta)},$$

da die geometrische Differenz der zwei Vektoren e und a die dritte Seite eines Dreiecks ist, dessen beide andere Seiten a und e sind. Die Energie ist:

$$W = \Sigma i^2 r = \Sigma \frac{e^2 + a^2 - 2ae\cos(\alpha - \beta)}{r}.$$

Digitized by Google

Die Bedingungen (4) können hier in der Form

$$\Sigma a \cos \beta = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9')$$
$$\Sigma a \sin \beta = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9'')$$

geschrieben werden; d. h. die Summen der Projektionen von a auf die Achsen p und q sind für einzelne geschlossene Stromkreise gleich Null.

Multiplizieren wir, wie vorher bei (6), die Gleichungen (9') mit den betreffenden Faktoren 2λ und (9'') mit 2μ, so bekommen wir:

$$W' = \Sigma \frac{e^2 + a^2 - 2ae \cos(\alpha - \beta)}{r} + 2\Sigma(\lambda \Sigma a \cos \beta) + 2\Sigma(\mu \Sigma a \sin \beta) = 0,$$

woraus analog den Gleichungen (7') folgt:

$$\frac{\partial W'}{\partial a_k} = 2 \frac{a_k - e_k \cos(\alpha_k - \beta_k)}{r_k} + 2\lambda_k \cos \beta_k + 2\mu_k \sin \beta_k = 0;$$

$$\frac{\partial W'}{\partial \beta_k} = -2 \cdot \frac{a_k e_k \sin(\alpha_k - \beta_k)}{r_k} - 2 a_k \lambda_k \sin \beta_k + 2 a_k \mu_k \cos \beta_k = 0^1).$$

Dividiert man die erste dieser Gleichungen durch 2 und die zweite durch $2a_k$, so erhält man:

$$\left.\begin{aligned} \frac{a_k - e_k \cos(\alpha_k - \beta_k)}{r_k} + \lambda_k \cos \beta_k + \mu_k \sin \beta_k = 0 \\ -\frac{e_k \sin(\alpha_k - \beta_k)}{r_k} - \lambda_k \sin \beta_k + \mu_k \cos \beta_k = 0 \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad (10)$$

Wenn wir uns alle Ströme λ als längs der Achse p gerichtete Vektoren denken, und ebenso alle μ längs der Achse q gerichtet, so drücken die beiden Gleichungen (10) die Bedingung aus, dass die geometrische Summe von $\frac{\bar{a}_k}{r_k}$, $\bar{\lambda}_k$ und $\bar{\mu}_k$ gleich dem Vektor $\frac{\bar{e}_k}{r_k}$ ist; d. h.

$$-\frac{\bar{e}_k - \bar{a}_k}{r_k} + \bar{\lambda}_k + \bar{\mu}_k = 0$$

oder

$$-\bar{i}_k + \bar{\lambda}_k + \bar{\mu}_k = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10')$$

---

[1]) Für jeden Vektor $\bar{a}_k$ müssen zwei Differentialquotienten $\frac{\partial W'}{\partial \bar{a}_k}$ und $\frac{\partial W'}{\partial \beta_k}$ genommen werden, da der Vektor selbst mittels zweier unabhängigen Variablen, der Länge (a_k) und der Richtung (β_k) bestimmt wird.

Digitized by Google

Die erste Gleichung (10) enthält nämlich die Projektionen auf die Richtung a_k, die zweite dieselben auf die zu a_k senkrechte Richtung. Ebenso bekommt man analog den Gleichungen (7″):

$$-\bar{i}_k + (\bar{\lambda}_o - \bar{\lambda}_u) - (\bar{\mu}_o - \bar{\mu}_u) = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10'')$$

Wenn wir jetzt wieder die f Faktoren λ und μ aus den n Gleichungen (10′) und (10″) eliminieren, indem wir die entsprechenden Gleichungen für einen und denselben Knotenpunkt addieren, so bekommen wir, ähnlich wie bei Gleichstrom, (n — f) Gleichungen $\Sigma \bar{i}_k = 0$, die das erste Kirchhoffsche Gesetz für das betreffende System ausdrücken. Somit ist das Theorem auch für diesen Fall bewiesen.

Beispiel. Die Gleichungen (8) des dritten Kapitels aus der charakteristischen Funktion abzuleiten.

Als unabhängige Variablen wählen wir die im dritten Kapitel benützten Spannungen a zwischen den Enden der Widerstände r; die Spannungen zwischen den Enden der Widerstände R sind dann gleich den Differenzen zweier benachbarten a, so dass

$$W = \Sigma \frac{(\bar{e}_k - \bar{a}_k)^2}{r_k} + \Sigma \frac{(\bar{a}_k - \bar{a}_{k-1})^2}{R_{k(k-1)}}.$$

In dieser Gleichung sind alle $\bar{a}$ voneinander unabhängig und wir bekommen:

$$\frac{dW}{d\bar{a}_k} = -2\frac{(\bar{e}_k - \bar{a}_k)}{r_k} + 2\frac{(\bar{a}_k - \bar{a}_{k-1})}{R_{k(k-1)}} - 2\frac{(\bar{a}_{k+1} - \bar{a}_k)}{R_{(k+1)k}} = 0;$$

woraus

$$\bar{a}_k\left(\frac{1}{r_k} + \frac{1}{R_{k(k-1)}} + \frac{1}{R_{(k+1)k}}\right) - \frac{\bar{a}_{k-1}}{R_{k(k-1)}} - \frac{\bar{a}_{k+1}}{R_{(k+1)k}} = \frac{\bar{e}_k}{r_k} \quad . \quad (11)$$

was mit den Gleichungen (8) des dritten Kapitels übereinstimmt. Die zweite Summe im Ausdrucke W gibt beim Differenzieren nach $\bar{a}_k$ zwei Glieder, da nicht nur das Glied

$$\frac{(\bar{a}_k - \bar{a}_{k-1})^2}{R_{k(k-1)}},$$

sondern auch das nächste Glied

$$\frac{(\bar{a}_{k+1} - \bar{a}_k)^2}{R_{(k+1)k}}$$

die Variable $\bar{a}_k$ enthält.

Digitized by Google

Bei der Lösung dieses Beispiels haben wir den Ausdruck W symbolisch in derselben Form wie für Gleichstrom benützt und auch einfach nach den Variablen $\bar{a}_k$ differenziert, in welchen die Grösse und die Lage des Vektors schon mit einbegriffen ist. Das ist gestattet, nachdem beim Beweise des allgemeinen Theorems gezeigt ist, dass das Differenzieren von W' nach a_k und β_k dieselben geometrischen Beziehungen ergibt, die für Gleichstrom algebraisch gelten.

Um den allgemeinen Fall mit Selbstinduktion und Kapazität betrachten zu können, muss man zunächst von den Momentanwerten ausgehen und auch die charakteristische Funktion für dieselben aufstellen. Das ist hier deshalb notwendig, weil nicht die ganze von den EMK. momentan geleistete Arbeit in Wärme umgesetzt wird; ein Teil davon wird in der Form der inneren Energie des Stromes aufgespeichert, um in den nächsten Augenblicken wieder abgegeben zu werden (infolge der Trägheit des magnetischen Feldes der Selbstinduktion resp. der elektrischen Elastizität des Dielektrikums). Infolgedessen gibt der aus den Effektivwerten bestehende Ausdruck der charakteristischen Funktion keine Auskunft über die eigentlichen augenblicklichen Vorgänge im betrachteten System, und man muss von den Momentanwerten ausgehen.

Der Ausdruck für die charakteristische Funktion sei der Einfachheit wegen schon von vornherein gegeben, und dann erst die Richtigkeit desselben bewiesen. Die charakteristische Funktion ist nämlich

$$W_t = \Sigma \left(w_t - \frac{L}{r} \frac{d w_t}{d t} \right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

wobei

$$w_t = \frac{\cos \varphi}{v} (e_t - a_t)^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (13)$$

Hierbei bedeuten die mit dem Zeichen t versehenen Buchstaben die Momentanwerte; φ ist die Phasenverschiebung und $v = \frac{r}{\cos \varphi}$ der scheinbare Widerstand eines Leiters. Der Ausdruck W_t gilt nur für sinusförmige Ströme und Spannungen.

Um zu beweisen, dass (12) wirklich die charakteristische Funktion ist, addieren wir zu (12) die Bedingungsgleichungen

$$\Sigma a_t = 0,$$

mit den entsprechenden λ_t multipliziert.

Digitized by Google

Wir erhalten:

$$W'_t = \Sigma w_t - \frac{d}{dt} \Sigma \frac{L}{r} w_t + 2 \Sigma (\lambda_t \Sigma a_t).$$

Die partiellen Differentialquotienten sind:

$$\frac{\partial W'_t}{\partial a_t} = -2 \frac{\cos \varphi}{v} (e_t - a_t) - \frac{L \cos \varphi}{r} \cdot \frac{1}{v} \cdot$$

$$\cdot \frac{\partial}{\partial a_t} \frac{d}{dt} (e_t - a_t)^2 + 2 \lambda_t = 0$$

für die Leiter an der Peripherie; die entsprechenden Gleichungen für die Leiter im Innern des Systems haben anstatt $2 \lambda_t$ den Ausdruck

$$2 (\lambda_t)_o - 2 (\lambda_t)_u$$

[siehe Gleichung (7′) und (7″)]. Es genügt, nur eine dieser beiden Arten der Gleichungen zu untersuchen. Es ist

$$\frac{d}{dt} (e_t - a_t)^2 = 2 (e_t - a_t) \left(\frac{d e_t}{dt} - \frac{d a_t}{dt} \right)$$

$$= 2 m (e_t - a_t) [e \cos (m t + \alpha) - a \cos (m t + \beta)];$$

$$\frac{\partial}{\partial a_t} \frac{d}{dt} (e_t - a_t)^2 = -2 m [e \cos (m t + \alpha) - a \cos (m t + \beta)];$$

$$\frac{L \cos \varphi}{r} = \frac{tg \varphi}{m} \cdot \cos \varphi = \frac{\sin \varphi}{m};$$

so dass

$$\tfrac{1}{2} \frac{\partial W'_t}{\partial a_t} = -\frac{1}{v} \cos \varphi [e \sin (m t + \alpha) - a \sin (m t + \beta)]$$

$$+ \frac{1}{v} \sin \varphi [e \cos (m t + \alpha) - a \cos (m t + \beta)] + \lambda_t = 0;$$

oder

$$-\frac{e}{v} \sin (m t + \alpha - \varphi) + \frac{a}{v} \sin (m t + \beta - \varphi) + \lambda_t = 0 \quad . \quad (14)$$

Diese Gleichung kann auch in der Form

$$-i \sin (m t + \xi) + \lambda_t = 0$$

oder

$$-i_t + \lambda_t = 0$$

geschrieben werden [siehe z. B. Gleichung (12) des dritten Kapitels]. Wir haben somit ähnliche Gleichungen wie (7′) bekommen und können ebenso diejenigen, welche (7″) analog sind, ableiten. Daraus folgt aus denselben Gründen wie vorher, dass (12) wirklich die charakteristische Funktion ist.

Digitized by Google

Der Ausdruck (12) lässt sich bedeutend vereinfachen, wenn wir eine symbolische Schreibweise einführen. Wie man aus der eben ausgeführten Entwicklung sieht, sind die Glieder mit $\frac{d}{dt}$ im Ausdruck (12) nur nötig, um aus

$$\sin(mt + \alpha) \quad \text{und} \quad \sin(mt + \beta)$$

die Grössen

$$\sin(mt + \alpha - \varphi) \quad \text{bezw.} \quad \sin(mt + \beta - \varphi)$$

zu bekommen. Dasselbe kann man aber auch symbolisch einfach dadurch ausdrücken, dass man

$$\frac{\partial W_t}{\partial a_t^{(\varphi)}}$$

schreibt, wobei das Zeichen (φ) bedeutet, dass die Winkel $(mt + \alpha)$ bezw. $(mt + \beta)$ um die Grössen φ verkleinert werden müssen, nachdem der entsprechende Differentialquotient nach da_t gebildet ist. Dabei entspricht φ demjenigen ν, welches im Nenner des betreffenden e oder a steht. Bei dieser Voraussetzung kann die charakteristische Funktion einfach in der Form

$$W_t = \Sigma \frac{(e_t - a_t)^2}{\nu}$$

geschrieben werden. Durch die symbolische Differentiation nach $a_t^{(\varphi)}$ bekommt man unmittelbar (14).

Jetzt kann man sogar zu den Effektivwerten übergehen, wenn man die algebraische Addition durch die geometrische ersetzt und unter dem Symbole (φ) die Drehung eines Vektors um den Winkel φ im Sinne der Nacheilung versteht. Dann ist die charakteristische Funktion

$$W = \Sigma \frac{(\bar{e} - \bar{a})^2}{\nu} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (15)$$

und, wenn dieselbe nur mittels unabhängiger Variablen ausgedrückt ist, so entsprechen die Gleichungen

$$\frac{dW}{d\bar{a}_t^{(\varphi)}} = 0$$

dem ersten Kirchhoffschen Gesetze für das betreffende System.

Als Beispiel sei Gleichung (23) des vorigen Kapitels aus der charakteristischen Funktion abgeleitet. Dieselbe hat hier eine ähnliche Gestalt, wie für den Fall ohne Selbstinduktion bei derselben Schaltung,

Digitized by Google

nur treten anstatt r und R die scheinbaren Widerstände v und u ein. Folglich kann man auf Grund der Gleichungen (11) unmittelbar schreiben:

$$\left[\frac{\bar{a}_k^{(\psi)}}{v_k} + \frac{\bar{a}_k^{(\varphi)}}{u_{k(k-1)}} + \frac{\bar{a}_k^{(\varphi)}}{u_{(k+1)k}}\right] - \frac{\bar{a}_{k-1}^{(\varphi)}}{u_{k(k-1)}} - \frac{\bar{a}_{k+1}^{(\varphi)}}{u_{(k+1)k}} = \frac{\bar{e}_k^{(\varphi)}}{v_k};$$

oder mit Bezug auf Fig. 57:

$$\frac{\bar{a}_k^{(\psi')}}{U_k} - \frac{\bar{a}_{k-1}^{(\varphi)}}{u_{k(k-1)}} - \frac{\bar{a}_{k+1}^{(\varphi)}}{u_{(k+1)k}} = \frac{\bar{e}_k^{(\varphi)}}{v_k} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (16)$$

was mit den Gleichungen (23) vollständig übereinstimmt.

Bei der Benützung der charakteristischen Funktion (15) bekommt man im allgemeinen symbolische Gleichungen von der Form (16), in welche die Vektoren a nicht in ihren richtigen, sondern in den um die entsprechenden Winkel φ gedrehten Lagen eintreten. Um von denselben zu den Gleichungen der Projektionen a_p und a_q übergehen zu können, muss die Abhängigkeit zwischen denselben und den Projektionen $(a^{(\varphi)})_p$ und $(a^{(\varphi)})_q$ bekannt sein. Anstatt nun den Vektor a um den Winkel φ zu verschieben, kann man einfach die Achsen p und q um denselben Winkel im entgegengesetzten Sinne drehen; dann bekommt man nach den bekannten Formeln für die Koordinatentransformation:

$$(a^{(\varphi)})_p = a_p \cos\varphi - a_q \sin\varphi;$$
$$(a^{(\varphi)})_q = a_q \cos\varphi + a_p \sin\varphi.$$

Mittels dieser Formeln kann man von den symbolischen Gleichungen von der Form (16) zu den Gleichungen der Projektionen übergehen. Man bekommt z. B. aus (16) für die Achse p:

$$\left[\frac{(a_k)_p \cos\psi'_k}{u_k} - \frac{(a_k)_q \sin\psi'_k}{u_k}\right] - \left[\frac{(a_{k-1})_p \cos\varphi_{k(k-1)}}{u_{k(k-1)}}\right.$$
$$\left. - \frac{(a_{k-1})_q \sin\varphi_{k(k-1)}}{u_{k(k-1)}}\right] - [\ldots] = \left[\frac{e_k^{(\varphi)}}{v_k}\right]_p = (j_k)_p.$$

Mit Rücksicht auf Fig. 57 und 58 stimmt diese Gleichung mit (23) überein. Die entsprechende Gleichung für die q-Achse ist analog, nur werden die Zeichen p und q vertauscht und die Glieder mit sin haben das Vorzeichen +.

Wir brauchen noch zu erwähnen, dass man die entsprechenden Formeln für Kapazität erhält, wenn man $m L = -\frac{1}{mC}$ setzt und die Phasenverschiebungen als negativ auffasst.

Digitized by Google

Die hier entwickelte Methode, die einzelnen Kirchhoffschen Gleichungen aus der charakteristischen Funktion abzuleiten, entspricht der Anwendung der Lagrangeschen bezw. Hamiltonschen Gleichungen in der Dynamik. Wie man dort durch Differentiation einer bestimmten Funktion nach den unabhängigen Koordinaten die einzelnen Bewegungsgleichungen erhält, so erhält man durch Differentiation der charakteristischen Funktion die Gleichungen, die den elektrodynamischen Zustand des Leitersystems bestimmen.

Wie die Lagrangesche Funktion die Differenz beider Energien (potentieller und kinetischer) darstellt, so entspricht auch die charakteristische Funktion der Energie des Systems oder hat wenigstens dieselbe Dimension und Form.

Wie in der Dynamik die Energiefunktion zuerst mittels unabhängiger Koordinaten ausgedrückt werden soll, und gewisse Gleichungen bestehen müssen, welche den geometrischen Zusammenhang der einzelnen Körper des Systems ausdrücken, so drücken auch hier die Gleichungen (4) das Schaltungsschema des Systems aus, und ebenso muss die charakteristische Funktion nur mittels unabhängiger Variablen ausgedrückt werden.

Digitized by Google

Das elektrische Blocksignal System Křižik.

Von

Adolf Prasch in Wien.

Mit 56 Abbildungen.

Die Grundsätze, auf welche hin das Fahren in Raumdistanz im Eisenbahnverkehre ausgebildet ist, sind entsprechend der im Laufe der Jahre im Betriebe gesammelten Erfahrungen so feststehende geworden, dass Neuerungen und Ergänzungen in dieser Hinsicht kaum zu erwarten sein dürften. Zur Bekräftigung dieser Anschauung kann wohl die Thatsache dienen, dass es einem versierten Fachmann auf diesem Gebiete, dem Professor an der k. k. technischen Hochschule zu Prag, Herrn Martin Boda, gelungen ist, eine Theorie für die Anordnung und Anwendung der einzelnen Blocksätze zu entwickeln und selbe in eine einwandfreie mathematische Form zu bringen, wobei sich diese Theorie allerdings nur auf das bekannte und bewährte Blocksystem der Weltfirma Siemens & Halske bezieht.

Aenderungen und Neuerungen auf diesem Gebiete können sich daher nur auf die Anwendung und Ausgestaltung geänderter Hilfsmittel und deren Anpassung an die gegebenen Verhältnisse unter Berücksichtigung der einschlägigen Grundsätze beziehen. In dieser Richtung ist dem Konstrukteur volle freie Hand gelassen und sind die möglichen Varianten in das Unendliche auszudehnen.

Eine Neuerung ist aber nur dann Erfolg versprechend, wenn sie gegenüber dem Bestehenden, sei es in Bezug auf Oekonomie, sei es in Bezug auf Sicherheit, und diese dürfte bei Beurteilung eines neuen Blocksignalsystems ausschlaggebend sein, wesentliche Vorteile verspricht. Dies ist aber nur dann möglich, wenn die mechanischen bezw. elektrischen Grundprinzipien, auf welchen selbe aufgebaut

Digitized by Google

werden, einen wesentlichen Unterschied gegenüber dem Bestehenden bedeuten und sich aus diesen Grundprinzipien ungeachtet der weiteren Ausgestaltung schon im vornehinein ein entsprechender Nutzen, sei es in dieser oder in jener Richtung, voraussehen lässt.

Um speziell der Blocksignalisierung zu gedenken, ist hier noch weiter hervorzuheben, dass selbe ausser der Gewähr der hohen Funktionssicherheit, noch eine grosse Schmiegsamkeit besitzen muss, um sich den vielgestaltigen, durch zahlreiche lokale Verhältnisse beeinflussten Bedürfnissen, in leichter und einfacher Weise anpassen zu können.

Zur Durchführung des Beweises, dass das von auch als genialen Konstrukteur bekannten Elektrotechniker Franz Krizik in Prag, welcher sich ausserdem bereits in seiner früheren Praxis in das Eisenbahnwesen vertieft hatte, ersonnene neue System den heutigen bestehenden Einrichtungen gegenüber thatsächlich eine Reihe wesentlicher Vorteile erwarten lässt, ist es um so mehr von Wert, das Wesen der Blocksignalisierung vorher etwas eingehender zu analysieren, als dasselbe nicht allgemein geläufig sein dürfte.

Zur Vermeidung der Kollision zweier auf ein und derselben Strecke in gleicher Richtung verkehrender Züge müssen die Entfernungen, welche zwischen denselben einzuhalten sind, genau geregelt werden. Diese Regelung war in früheren Zeiten bloss den Stationen vorbehalten, welche als Knoten- und Dirigierungspunkte, mit den Nachbarstationen durch Telegraph und Signalisierung verbunden, vollkommenen Ueberblick über den jeweiligen Standpunkt des Zugsverkehrs erhielten und sohin am besten zu beurteilen in der Lage waren, ob und wann ein Folgezug dem bereits voraneilenden Zuge nachgelassen werden dürfe. Doch auch hierin waren sie durch gewisse Vorschriften insoferne eingeschränkt, als die kürzesten Zwischenpausen, innerhalb welcher dieses Nachfahren statthaft war, ganz genau festgesetzt wurden. In der Regel galt es, dass ein langsam fahrender Zug dem vorgehenden Zuge von gleicher oder grösserer durchschnittlicher Fahrgeschwindigkeit nur nach Ablauf von 5 Minuten, ein schneller verkehrender Zug dem langsameren vorgehenden Zuge erst nach Ablauf von 10 Minuten nachfolgen dürfe. Hiebei war aber stets auch die zwischen der Abgangs- und der nächsten in der Verkehrsrichtung gelegenen Station befindlichen Strecke insoferne von Einfluss, als mit Sicherheit darauf gerechnet werden musste, dass der vorhergehende Zug bei Einhaltung seiner vorgeschriebenen Fahrgeschwindigkeit mindestens 5 Minuten früher in der Nachbarstation einlangen kann, als sein Nachfolger. Traf diese Voraussetzung, sei

Digitized by Google

es bedingt durch die Länge der Strecke oder die geringe Geschwindigkeit des Zuges, nicht zu, so durfte der langsam fahrende Zug entweder die Station nicht früher verlassen, bis ihm der nachfahrende schnellere Zug in derselben vorgeeilt war, oder es wurde der nachfolgende Zug in der Station so lange zurückbehalten, bis der entsprechende Zeitraum verflossen und sohin nicht mehr zu befürchten stand, dass er den vorfahrenden Zug noch auf der Strecke einholen könne.

Diese noch heute auf Bahnen mit geringem Verkehre und Zügen geringer Fahrgeschwindigkeit übliche Methode zur Regelung des Zugsverkehres, welche als das „Fahren in Zeitintervall" bezeichnet wird, hat eine Reihe ganz bestimmter Nachteile, indem erstens, da ja der voraneilende Zug infolge eines auftretenden Gebrechen oder eines sonstigen Hindernisses auf der Strecke liegen bleiben und von dem nachfahrenden Zuge eingeholt werden kann, die Gefahr einer Kollision auf der Strecke nur verringert, aber nicht beseitigt ist, und zweitens eine fortwährende Verzögerung im laufenden Zugsverkehre eintreten muss, weil durch das lange und häufige Warten der Züge in den einzelnen Stationen viel Zeit verloren geht.

Bei dem raschen und ungeahnten Anwachsen des Verkehres auf der Mehrzahl der Bahnen, welcher eine bedeutende Vermehrung der verkehrenden Züge bedingte, war das Festhalten dieser Methode der Regelung der Zugfolge nach Zeitintervall nicht mehr möglich, ohne eine vollkommene Stockung des Verkehres herbeizuführen.

Hier trat nun das Fahren der Züge in „Raumdistanz" in seine Rechte, welches, von England ausgehend, sich baldigst auf dem Kontinente einbürgerte und vielfach seitens der staatlichen Behörden für alle Bahnen höherer Ordnung als obligatorisch erklärt wurde.

Die Regelung des Zugsverkehres beim Fahren in Raumdistanz beruht auf dem Grundsatze, dass ein Zug dem anderen nur in einer ganz bestimmten Entfernung folgen, beziehungsweise dass in einer bestimmten, vorher genau abgegrenzten Strecke immer nur ein Zug verkehren darf.

Kommt ein Zug an den Anfangspunkt einer solchen Strecke, bevor der vorangehende Zug dieselbe verlassen hat, so muss er unbedingt so lange anhalten, bis dessen Führer die positive Anzeige erhält, dass der vorangehende Zug aus dieser Strecke ausgetreten ist.

Dies bedingt, dass an dem Eingange einer jeden dieser Strecken ein dem Führer des Zuges sichtbares Signal aufgestellt wird, welches sich sofort auf „Halt" stellt, sobald ein Zug in diese Strecke eintritt

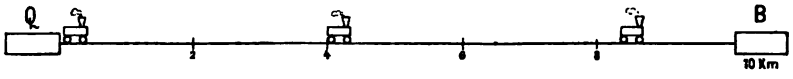
Digitized by Google

und erst dann auf „Frei" gestellt werden kann, wenn der Zug diese Strecke verlassen hat.

Da der Austritt aus der einen Strecke mit dem Eintritte in die folgende Strecke gleichbedeutend und somit eigentlich jede Strecke durch zwei Signale abgeschlossen ist, treten, soll die vorhergehend angeführte Bedingung erfüllt werden, diese beiden Signale insoferne in ein bestimmtes Abhängigkeitsverhältnis, als die Stellung des Signales zur gestatteten Einfahrt eines Zuges in eine solche Strecke erst dann erfolgen darf, wenn das Signal der der Fahrtrichtung nächst liegenden Strecke das Verbot der Einfahrt zeigt.

Die beiden Signale sind nun in der Regel räumlich voneinander so weit entfernt situiert, dass die Herstellung einer rein mechanischen Abhängigkeit mit der grössten Schwierigkeit verbunden wäre. Man muss sich daher zur Erreichung dieser Abhängigkeit der Elektrizität als Hilfsmittel bedienen, welche mit Leichtigkeit auf weite Entfernungen entsendet und dort zur Arbeitsleistung herangezogen werden kann.

Fig. 1.



Bevor jedoch an die nähere Feststellung der für das Fahren in Raumdistanz geltenden Gesetze und der mit demselben in Verbindung stehenden Signalisierung geschritten wird, seien noch die Vorteile, welche sich aus denselben in Bezug auf die raschere Abfertigung der Züge gegenüber dem Fahren nach Zeitintervall ergeben, des Näheren erörtert. Zu diesem Zwecke sei eine 10 km lange Strecke zwischen den beiden Stationen A und B (Fig. 1) gedacht. Bei einer durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit eines Zuges von 36 km pro Stunde, welche ungefähr der Postzugsgeschwindigkeit entspricht, benötigt ein Zug zum Durchfahren dieser Strecke rund 17 Minuten und darf ein schneller fahrender Zug demselben erst in 10 Minuten nachfolgen. Es können also, da ein dritter nachfolgender Zug erst in weiteren 5 Minuten abgelassen werden dürfte, in diesem Falle nur drei Züge gleichzeitig auf dieser Strecke verkehren. Aber auch umgekehrt, wenn ein schnell fahrender Zug voraneilt, welcher bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 48 km in der Stunde, zum Durchfahren dieser Strecke 12½ Minuten benötigt und demselben zwei Züge von geringerer, aber im gegenseitigen Verhältnisse gleicher Geschwindigkeit in Intervallen von je 5 Minuten nachfolgen sollen.

Digitized by Google

können und dürfen nie mehr als drei solcher Züge sich auf dieser Strecke befinden.

Ist der erste ein schneller, der zweite ein langsamer und der dritte wieder ein schneller Zug, so ergibt sich nach Betracht der Intervalle, dass gar nur zwei solcher Züge auf dieser Strecke gleichzeitig verkehren können.

Bei dichtem Zugsverkehr hat dies eine Anstauung der Züge in den Stationen im Gefolge, welche, wegen der zumeist grossen Raumbeschränkung, häufig zu Zugsverspätungen Anlass geben und, da die Stationen durch die vielen Weichen und die Zugskreuzungen stets als Gefahrpunkte zu betrachten sind, direkt eine Gefährdung der Züge, somit auch an Personen und Sachen, bedeuten würde.

Teilt man hingegen diese Strecke von 10 km unter Berücksichtigung der Richtungs- und Neigungsverhältnisse der Bahn in Bezug auf deren Einfluss auf die Fahrgeschwindigkeit in fünf gleiche Teile, schliesst jeden solchen Teil durch ein Signal ab, so können,

Fig. 2.

wie dies Fig. 2 zeigt, in dieser Strecke, wenn zum Grundsatze aufgestellt ist, dass in jedem dieser Abschnitte nur ein Zug sich befinden darf, 5 Züge zu gleicher Zeit verkehren, ohne dass eine Kollision dieser Züge zu befürchten ist. Auch die Fahrgeschwindigkeit der einzelnen Züge ist hiebei von keinem Einfluss, da ja auch der schneller fahrende Zug vor einem das Anhalten bedeutenden Signale stehen bleiben muss, und im Falle ein solches nicht erfolgt, dies nur einem groben Vergehen des den Zug dirigierenden Organes zur Last zu schreiben ist.

Bei sehr dichtem Zugsverkehre, wie sich solcher von grösseren Städten aus als sogenannter Lokalverkehr entwickelt, kann selbstverständlich die Anzahl der durch Unterteilung der Gesamtentfernung geschaffenen einzelnen Strecken, die nur von einem Zuge befahren werden dürfen, noch vergrössert werden und könnten, wenn man 500 m als Minimum der Streckenlänge bezeichnet, in der vorliegenden 10 km langen Strecke statt 5, 20 Züge zu gleicher Zeit verkehren, ohne dass hiedurch eine Gefahrserhöhung zu befürchten wäre. Zugsstockungen, wie solche auch hier vorkommen können, verteilen sich hier auf die Strecke und entlasten die Stationen.

Digitized by Google

Die erste Anwendung fand das Fahren in Raumdistanz auf den englischen Bahnen. Die einzelnen Abschnitte der Strecke wurden dort als Blocks bezeichnet, woher auch der auf dem Festlande adoptierte Ausdruck „Blocksignalisierung" für die zur Durchführung dieser Art der Zugsfolge angewendeten Signalisierungsmethoden abgeleitet wurde.

Ursprünglich begnügte man sich, zu Anfang jeder Strecke ein Abschlusssignal aufzustellen und dasselbe durch einen Wärter bedienen zu lassen. Derselbe hatte dasselbe, sobald der Zug in die Blockstrecke eingetreten war, auf „Verbot der Fahrt" oder „Halt" zu stellen und durfte einem nachfolgenden Zuge die Weiterfahrt durch „Freistellung" des Signales erst dann gestatten, wenn er von dem nächsten in der Fahrtrichtung des Zuges gelegenen Signalwärter das Aviso erhalten hatte, dass der vorangehende Zug die Strecke bereits verlassen habe und sohin dem Eintritte eines weiteren Zuges in diese Strecke kein Hindernis mehr entgegenstehe. Die gegenseitige Verständigung der beiden Wärter erfolgte zumeist mittels elektrooptischer und auch elektro-akustischer Signale.

Diese Art der Signalisierung bot jedoch nicht die für den Eisenbahndienst unbedingte Zuverlässigkeit, indem es der Willkür eines jeden Wärters in die Hand gegeben war, das Signal zu stellen. Oberingenieur Frischen der Firma Siemens & Halske war es, welcher in Erkenntnis der Unzulässigkeit dieser Art der Signalisierung durch das von ihm erdachte, unter dem Namen des Blocksignalsystemes „Siemens & Halske" bekannte und weit verbreitete Blocksignal, die Grundbedingungen für eine den Bedürfnissen des Eisenbahnverkehres Rechnung tragende Blocksignalisierung, schuf.

Er ging von dem Grundsatze aus, dass jeder Wärter sein Signal nach Belieben auf „Halt" und auch „Frei" stellen können muss, sobald dasselbe die Freilage einnimmt und kein Zug in der nächstfolgenden Strecke verkehrt. Ist jedoch ein Zug in dieser Strecke eingetreten, so ist er verpflichtet, das in Betracht kommende Signal auf „Halt" zu stellen und dasselbe in dieser Lage festzulegen oder zu verriegeln, wie der technische Ausdruck lautet. Hat er sein Signal verriegelt, so vermag er dasselbe so lange nicht auf „erlaubte Fahrt" zu stellen, bis dieses Signal nicht von dem Folgewärter auf elektromechanischem Wege entriegelt wurde. Würde es nun der betreffende Wärter unterlassen, sein eigenes Signal auf „Halt" zu stellen und in dieser Lage zu verriegeln, so könnte dies doch zu keiner Gefährdung der Züge Veranlassung geben, weil er die Erlaubnis zur Freigabe

Digitized by Google

des vorliegenden, der Deckung der eigenen Strecke dienenden Signales so lange nicht geben kann, bis er das von ihm bediente Signal auf „Halt" gestellt und in dieser Lage „verriegelt" hat. Es könnte hiedurch sohin nur eine Verzögerung im Zugsverkehre, niemals aber eine Kollision zweier in derselben Richtung verkehrenden Züge hervorgerufen werden.

Jeder Wächter ist sohin von dem der Fahrtrichtung folgenden nächsten Wärter in Bezug auf die Freistellung absolut abhängig, wodurch eine Gefahr nahezu absolut ausgeschlossen ist, ausser für den nahezu unannehmbaren Fall, dass alle Wärter einer Strecke gleichzeitig ihre Pflicht vernachlässigen. Aber auch dafür ist vorgesorgt, indem jede Station ein Ausfahrtssignal erhält, welches von dem Signale des ersten Wärters der Strecke in gleicher Weise abhängig gemacht ist, wie das Signal dieses Wärters von dem Signale des nächsten Wärters. Es müsste sonach für den bereits als unannehmbar bezeichneten Fall auch die Station mit im Bunde sein.

Nun wäre nur noch die Möglichkeit vorhanden, dass ein Wärter, welcher sein Signal vorschriftsmässig auf „Halt" gestellt und in dieser Lage verriegelt hat, dem rückwärts liegenden Wärter ein zweites Mal die Freistellung seines Signales gestattet, d. h. dass er dessen auf „Halt" gestelltes Signal entriegelt. Durch ein solches Vorgehen könnten allerdings zwei Züge in eine Blockstrecke gelangen. Um dies zu verhindern, wurde eine Einrichtung getroffen, durch welche bei gesperrtem Signal nur einmal nach rückwärts frei gegeben werden kann. Um ein nächstesmal „Frei" geben zu können, muss der betreffende Wärter vorerst den von ihm bedienten Semaphor auf „Frei", sodann auf „Halt" stellen und verriegeln. Da er sein bereits auf „Halt" gestelltes und in dieser Lage verriegeltes Signal aber nur mit Zustimmung des nächsten Wärters auf „Frei" stellen kann, ist auch diese Gefahr beseitigt.

Die Manipulation eines Wärters beschränkt sich nach Vorbeifahrt eines Zuges auf folgende zwei Manipulationen: 1. Haltstellung des eigenen Signales und 2. Verriegelung des Signales in dieser Lage. Die Freigabe nach rückwärts erfolgt gleichzeitig mit der Verriegelung des eigenen Signales.

Als sichtbares Signal zum Abschlusse einer jeden Blockstrecke wird nunmehr fast allgemein das Armsignal angewendet. Dieser Arm, der durch die um 45° nach aufwärts geneigte Lage das Zeichen „Frei", durch die horizontale Lage das Zeichen oder Signal „Halt" gibt, ist, um die Sichtbarkeit desselben sicher zu erreichen, am oberen

Digitized by Google

Ende eines hohen Mastes drehbar angebracht und wird die Stellung desselben mittels eines Stellhebels und Doppeldrahtzugverbindung bewerkstelligt. In der Mehrzahl der Fälle befindet sich die Stellvorrichtung nicht unmittelbar an dem Maste befestigt, sondern ist in abgeschlossenen Räumlichkeiten, in Verbindung mit den die Abhängigkeit von den Nachbarwärtern bedingenden Einrichtungen, untergebracht, und werden von da die Stahlzugdrähte auf Rollen zu der eigentlichen Signalvorrichtung, unter dem Namen „Semaphor" gekannt, geführt. Diese Uebertragung der Bewegung von der Stellvorrichtung auf den Signal- oder Semaphorarm kann bei geradliniger Führung der Zugdrähte und sorgfältiger Montage bis auf 1200 m weit erfolgen.

Die Stellung des Semaphors erfordert jedoch, da der Signalarm, weit ausladend, sehr solid gehalten werden muss, trotzdem derselbe durch Gegengewichte equilibriert wird, einen immerhin ganz bedeutenden Kraftaufwand.

Die Verriegelung oder Festlegung des Signales, wenn es auf „Halt" gestellt, und die durch den Nachbarwächter vorzunehmende Entriegelung desselben wird, hier auf den Stellapparat übertragen, da, wenn der Stellhebel festgelegt, d. h. unbeweglich gemacht ist, eine Umstellung des Signales nicht erfolgen kann. Nun muss die Konstruktion der Stellvorrichtung, welche durch den auf denselben ausgeübten Zug oder Druck bei Umstellung stark in Anspruch genommen ist, um den von aussen einwirkenden Kräften für die Dauer Widerstand leisten zu können, ziemlich robust gehalten werden. Die gleiche Anforderung tritt an die Verriegelungs- oder Sperrvorrichtung heran, damit sie durch einen auf den Stellhebel ausgeübten Zug bezw. Druck nicht verbogen oder gebrochen werden kann. Da sowohl die Festlegung der Sperrvorrichtung als deren Freigabe auf elektromagnetischem Wege erfolgt und für die Durchführung der hiebei bedingten Arbeitsleistung nach dem System von Siemens & Halske Induktionswechselströme verwendet werden, ist mit Rücksicht auf die durch Handantrieb eines Cylinderinduktors erreichbare geringe Intensität der erzeugten Ströme, die Arbeitsleistung, die denselben zugemutet werden kann, eine äusserst geringe und für keinen Fall ausreichend, die Verriegelungsvorrichtung direkt zu bethätigen. Für die Verriegelung selbst oder die Einsenkung des Sperrriegels in die vorgesehene Nute, kann die Kraft des bedienenden Wärters direkt verwertet werden, indem er denselben mit der Hand in diese Nute hineindrückt. Da aber die Entriegelung bezw. das Herausheben des

Digitized by Google

Riegels aus der Nute, von der Ferne angeregt wird und sich dem Einflusse des bedienenden Wärters entzieht, muss in Berücksichtigung des Vorgesagten, wonach die motorische Kraft des entsendeten Stromes zur direkten Bethätigung des Riegels bezw. zum Herausheben desselben aus der Nute nicht ausreicht, die zur Leistung dieser Arbeit erforderliche Kraft schon bei der Verriegelung aufgespeichert werden, was durch Spannung kräftiger Spiralfedern, die den Riegel in die Höhe zu treiben trachten, bewerkstelligt wird. Der elektrisch bethätigten Einrichtung fällt nur die Aufgabe zu, den einmal niedergedrückten Sperrhebel in dieser Lage festzuhalten und demselben, im Falle des Bedarfes, die rückläufige Bewegung zu gestatten. Diese Einrichtung charakterisiert sich sonach in ihrem Wesen als nichts anderes als eine Arretier- und Auslösevorrichtung, wie solche für den Betrieb aller elektromagnetischen Signalapparate zur Anwendung gelangt, welche eine relativ grosse Arbeit zu leisten haben, für deren Auslösung aber nur geringe elektromotorische Kräfte zur Verfügung stehen, weshalb die zum Antriebe erforderliche Kraft durch Aufziehen von Gewichten, Spannung von Federn aufgespeichert wird, wie z. B. bei den Glockensignalapparaten für die durchlaufenden Streckensignale. Auch bei diesen Apparaten fällt der elektromagnetischen Einrichtung nur die Aufgabe zu, die Hemmung, welche sich der Wirkung entgegensetzt, für kurze Zeit aufzuheben und somit den Apparat durch Auslösung zum Gange zu bringen.

Derlei Auslösevorrichtungen müssen nun, um selbe durch die relativ schwachen Ströme, wie solche von Induktoren oder galvanischen Batterien erzeugt werden, in Wirksamkeit zu setzen, eine möglichst geringe Arbeitsleistung erfordern, daher so zart als möglich gehalten und auf das Exakteste gearbeitet sein, um die durch Reibung und Trägheit entstehenden Bewegungshindernisse auf das erreichbare Minimum herabzudrücken. Auf der anderen Seite ist diese Auslösevorrichtung aber in der Ruhelage des Signales wieder dem Druck des Signalwerkes, welches entsprechend der erforderten Leistung massiv gehalten sein muss, ausgesetzt, muss daher entsprechend widerstandsfähig sein. Diese Gegensätze, wonach sich auf der einen Seite sehr zarte, wenig widerstandsfähige, auf der anderen Seite hingegen starke, grosser Inanspruchnahme ausgesetzte Mechanismen gegenüberstehen, die harmonisch ineinander zu greifen haben, lassen sich bei Signalapparaten mit Laufwerken durch Anwendung grosser Uebersetzungen leicht ausgleichen, da hiedurch der Druck des Laufwerkes auf die Auslösevorrichtungen bedeutend herabgemindert werden kann. Viel

Digitized by Google

schwieriger gestaltet sich diese Aufgabe, wo es sich, wie bei diesen Blockapparaten, um geradlinige Bewegungen handelt.

Dessenungeachtet ist auch hier die Lösung in geradezu genialer Weise gelungen, wofür wohl die mehr als 25jährige praktische Verwendung und ihre immer steigende Verwertung im Eisenbahndienste spricht. Dass diese Apparate im Laufe ihrer Anwendung einen den gewonnenen Erfahrungen Rechnung tragenden Vervollkommnungsprozess durchgemacht haben, ist bei einer Weltfirma wie die in Rede stehende, geradezu selbstverständlich, aber an dem einmal aufgestellten Grundprinzipe hat sich im Laufe der Zeiten nichts geändert.

Haben nun auch die so ziemlich gleichen Grundbedingungen entsprechenden mechanischen Signalapparate mit elektrischer Auslösung durch die Erfahrungen der Praxis ihre Lebensfähigkeit erwiesen, so lässt sich doch nicht leugnen, dass diese Verquickung von zarten und groben Mechanismen eine ganz bedeutende Serie von Nachteilen in sich birgt. Die zarteren Mechanismen sind an und für sich vielen Störungen unterworfen, sie bestehen zumeist aus einer grösseren Anzahl von Bestandteilen, deren jeder Anlass zum Versagen geben kann. Aber selbst wenn dieser ganze Mechanismus als solcher intakt bleibt, so vermögen schon ganz geringe Reibungserhöhungen, wie solche durch Rostflecke, Verstauben, Stocken des Schmieröles etc. entstehen, leicht seine Funktionsthätigkeit zu behindern. Es bedingt dies daher eine sehr zarte Regulierung und äusserst sorgfältige Wartung. Da hier nicht mit einem gewissen Kraftüberschusse gearbeitet wird, kann fernerhin eine oft ganz geringe Verminderung der Stromstärke, wie solche durch Erhöhung des Leitungswiderstandes, durch Ableitungen und bei Anwendung von Batterien als Elektrizitätsquellen, durch verminderte Stromabgabe leicht eintreten kann und auch häufig eintritt, den sonst intakten Mechanismus an seiner regelrechten Wirkung behindern.

Wiewohl nun bei den eigentlichen Blockapparaten der Firma Siemens & Halske infolge ihrer sinnreichen Konstruktion und Anordnung derartige Versager direkt eine Gefahr nicht herbeiführen können, so geben sie doch zu Störungen im Zugsverkehre Anlass, und man muss, da die Fehlerquellen oft sehr versteckt liegen, sohin schwer aufzufinden und zu beheben sind, während der oft recht lange dauernden Funktionsunfähigkeit, um den Verkehr aufrecht zu erhalten, zu Provisorien die Zuflucht nehmen, die nun wohl nicht mehr jene Sicherheit gewähren und daher indirekt eine Erhöhung des Gefahrsmomentes bedeuten.

Digitized by Google

Zur Zeit der Entstehung dieser Signale war eben noch nicht die Möglichkeit geboten, hinreichend starke elektromotorische Kräfte zu verwenden, und musste man daher, um die Fernwirkung der Elektrizität für die in Rede stehenden Zwecke ausnützen zu können, notgedrungen zu diesem Auskunftsmittel die Zuflucht nehmen.

Eine der Grundbedingungen für die Sicherheit des Zugsverkehres ist eine verlässliche Signalisierung. Dieselbe soll daher möglichst wenig Störungen unterworfen sein und muss man, sobald durch die Fortschritte der Technik die Handhabe zu deren Verbesserung gewonnen ist, durch Verwertung derselben diese Verbesserung energisch durchzuführen trachten.

Die Grundsätze für jede richtige und verlässliche Funktion einer mechanischen Einrichtung, und als solche sind die Signalapparate in Verbindung mit den Signalmitteln zu betrachten, sind ja schon von altersher gegeben. Diese sind möglichst einfache und derbe Bauart des Mechanismus und Arbeiten mit Kraftüberschuss, um zufällige Hindernisse überwinden zu können.

War man früher für die elektrische Fernübertragung der Kraft und Heranziehung derselben zur Arbeitsleistung an eine sehr niedere untere Grenze gebunden, so haben sich die Verhältnisse im Laufe der Jahre durch die Möglichkeit, elektromotorische Kräfte von beliebiger Stärke zu erzeugen und dieselben nach Bedarf zu verwenden, wesentlich geändert. Es ist nicht mehr nötig, die Arbeitsleistung durch Aufspeicherung der mechanischen Kräfte zu sichern und die Wirksamkeit derselben von jenen erkünstelten Mechanismen, wie wir solche als Auslösemechanismen kennen, abhängig zu machen. Man ist nunmehr in der Lage, durch Erzeugung und Entsendung stärkerer elektromotorischer Kräfte den Mechanismus direkt elektrisch anzutreiben und sich von den Zwischenmechanismen unabhängig zu machen, ohne dass hiedurch die für bestimmte Zwecke erforderliche gegenseitige absolute Abhängigkeit im mindesten beeinflusst würde.

Auf diesem Grundgedanken ist das Blocksignalsystem Krizik aufgebaut, welches den direkten elektrischen Antrieb der hier in Verwendung kommenden Laufwerke und hiemit auch die direkte, von den Wärtern nur insofern abhängige Stellung der Signale anstrebt, als die letzteren nur die Anregung zur beabsichtigten Umstellung zu geben haben.

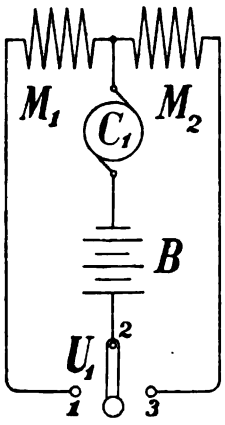
Inwiefern dies gelungen und in welcher Weise die Abhängigkeitsgestaltung in absoluter Weise durchgeführt wurde, möge aus der nun folgenden Beschreibung des Blocksignales ersehen werden.

Digitized by Google

Zergliedert man die Bewegung eines Semaphorarmes, so zeigt sich, dass dieselbe nur aus zwei bestimmt abgegrenzten, entgegengesetzt gerichteten Bewegungen besteht, und zwar einmal in der Drehung um seine Achse 45° nach aufwärts und das andre Mal in der Drehung um 45° nach abwärts. Da für einen direkten elektrischen Antrieb nur der Elektromotor mit Erfolg verwendet werden kann, war die zu lösende Aufgabe einfach die, den Elektromotor einmal in Drehung nach rechts, das andre Mal in Drehung nach links zu versetzen und diese doppelte Drehbewegung durch eine entsprechende Hebelübersetzung in eine der Bewegung des Semaphorarmes entsprechende Pendelbewegung umzuwandeln und auf den Semaphorarm zu übertragen.

Da bekanntlich bei einem Elektromotor ein Wechsel der Stromrichtung keinen Wechsel der Drehrichtung hervorruft, eine Verstellung der Komutatorbürsten um 90°, die nach vollendeter Umdrehung in der einen Richtung zu erfolgen hätte, diesen Zweck zwar erfüllt, aber zu mechanischen Komplikationen, die vermieden werden wollten, geführt hätte, wurden für diese Zwecke zwei besondere Anordnungen ersonnen.

Fig. 3.



Es ist zum Verständnis derselben noch in Wiederholung von etwas bereits vorher Gesagtem zu erwähnen, dass die Stellung des Signales auf „Halt" immer von dem Wärter, welcher das Signal bedient, die Stellung des Signales auf „Frei" dagegen nur von dem in der Fahrtrichtung nächstgelegenen Wärter angeregt bezw. bewerkstelligt werden darf.

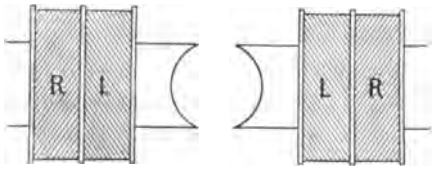
Nach Fig. 3 (schematische Darstellung) werden um die Magnetschenkel des Elektromotors zwei voneinander isolierte und getrennte Drähte so gewunden, dass der Strom bei Durchgang durch die eine Magnetwindung in den Elektromagneten die entgegengesetzte Polarität hervorruft, wie bei Durchgang durch die andere Windung. Die beiden äusseren Enden dieser mit M_1 und M_2 bezeichneten Windungen stehen mit den Punkten 1 bezw. 3 des Umschalters U_1 in Verbindung, die beiden inneren Enden werden miteinander verbunden und führen gemeinsam zum Anker C_1 und von da zur Elektrizitätsquelle B und zu Punkt 2. Wird nun beispielsweise ein elektrischer Strom durch die Spule M_1 entsendet, so findet er seinen Weg von B über C_1, M_1, U_1 zur Ausgangsstelle zurück. Der Motor wird sich, wenn der Strom hinreichend stark ist, in einer bestimmten Richtung, sagen wir nach rechts, drehen.

Digitized by Google

Durchläuft nun ein Strom, von B ausgehend, die Spule M_2, so wird in dem Elektromagnete die entgegengesetzte Polarität wie vorher, in dem Anker C_1 hingegen wieder die gleiche Polarität erregt, der Motor muss sich unter sonst gleichen Bedingungen nach links drehen.

Die Stromrichtung als solche bleibt für beide Drehrichtungen ganz ohne Einfluss, da für den Fall verkehrter Stromrichtung in M_1 gegenüber M_2 in dem Elektromagnete zwar die gleiche Polarität wie vorher, dagegen aber in dem Induktor die entgegengesetzte Polarität

Fig. 4.

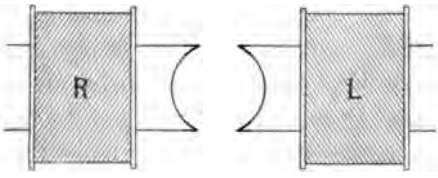


erregt werden müsste, so dass in den Verhältnissen keine Aenderung entstehen kann.

Die Anordnung der Feldmagnetwickelung kann bei zwei- und mehrpoligen Elektromotoren, da sich die gemeinsame Wickelung auf eine Spule wegen der Möglichkeit von durch Isolationsfehler entstehenden Berührungen nicht empfiehlt, wie dies in Fig. 4 und 5 für einen zweipoligen Motor angedeutet ist, auf zweierlei Weise erfolgen.

In dem einen Falle werden (Fig. 4) auf jeden Magnetschenkel zwei Magnetspulen entgegengesetzter Windungsrichtung aufgesetzt.

Fig. 5.



In dem anderen Falle (Fig. 5) kommt auf jeden Magnetschenkel nur eine Spule doppelter Länge, deren Windungsrichtung der auf den anderen Schenkel aufgesetzten Spule entgegengesetzt ist. Die Windungsrichtung ist hier mit den Buchstaben R und L bezeichnet.

Bei mehrpoligen Elektromotoren empfiehlt sich die zweite Anordnung besser und werden nach derselben beispielsweise auf jeden geradzahligen Pol rechtsgewundene und auf jeden ungeradzahligen Pol linksgewundene Spulen aufgesetzt.

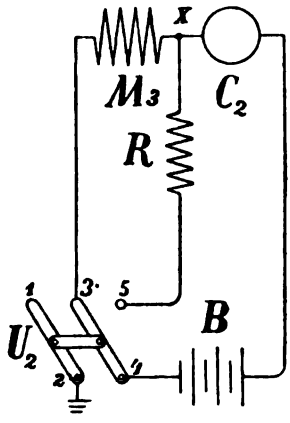
Digitized by Google

Nach der zweiten Methode des Wechsels der Drehrichtung wird der Motor für die eine Drehrichtung als Serienmotor, für die andere Drehrichtung als Nebenschlussmotor geschaltet, wobei jedoch am Motor bezw. im Motorgehäuse eine Umschaltung nicht erfolgt, sondern diese Umschaltung von Hand durch einen entsprechend mit der Leitung verbundenen Umschalter bewerkstelligt wird.

Die Art und Weise dieser Anordnung lässt sich aus der schematischen Darstellung Fig. 6 ersehen. In dieser Figur bezeichnet M_3 die Windungen des oder der Feldmagnete, C_2 den Induktor, B die Elektrizitätsquelle und U_2 den Umschalter.

In der einen Lage dieses Umschalters U_2, dessen beide Hebel durch eine isolierende Querschiene so miteinander verbunden sind, dass sie sich stets zusammen verschieben müssen, liegt der rechte Hebel auf dem Punkte 3 auf, wogegen die leitende Verbindung des linksseitigen Hebels unterbrochen ist. In diesem Falle wirkt der Motor als Serienmotor und zirkuliert der Strom von der Elektrizitätsquelle B über U_2, M_3, C_2 zu B zurück. Bei dem Knotenpunkte x vermag er sich nicht zu teilen, weil die Verbindung zwischen U und 5 unterbrochen ist.

Fig. 6.



Wird der Umschalter jedoch von links nach rechts verschoben, so dass der linke Hebel des Umschalters auf P3, der rechte Hebel auf P5 aufzuliegen kommt, so geht der Strom von B über 4, U_2, 5, R zu x, teilt sich hier in zwei Teile und kehrt einenteils über C_2, andernteils über M_3, U_2 zu B — zurück. Der Motor wirkt als Nebenschlussmotor mit entgegengesetzter Drehrichtung, weil der Strom die Magnetwickelung nunmehr von rechts nach links und nicht wie vorher von links nach rechts durchfliesst, wogegen bezüglich des Induktors eine Aenderung der Stromrichtung nicht stattfindet.

Soll, wie dies für die Blocksignalisierung erforderlich ist, die Stellung des Signalwerkes von zwei Punkten aus erfolgen, so ergibt sich die Schaltungsanordnung nach dem Schema Fig. 7. In demselben bedeutet M_4 die Feldmagnetwickelung, C_3 den Induktor, B die Elektrizitätsquelle und U_3 den Umschalter unmittelbar bei dem Blockapparate. E und E_1 sind Erdleitungen und U_4 ein einhebeliger Umschalter zur Stellung des Blockapparates bezw. Stellwerkes von der

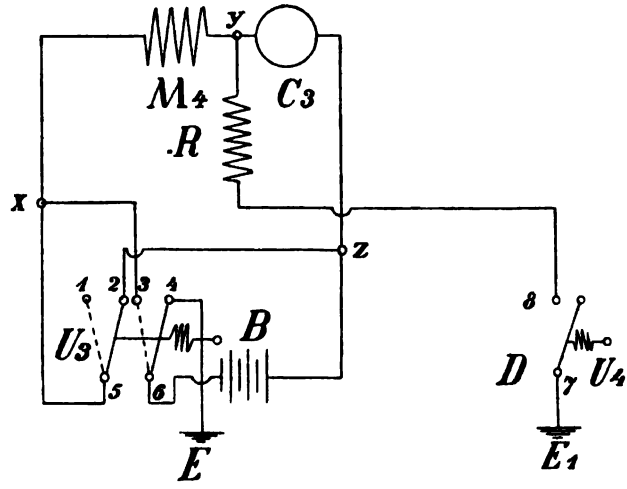
Digitized by Google

entfernten Stelle aus, in diesem Falle von der nächstgelegenen Blockstation in der Fahrtrichtung. Normal, also wenn durch den Wärter nicht bethätigt, werden die beiden Umschalter U_3 und U_4 durch Spiral- oder Druckfedern in der in Fig. 7 durch ausgezogene Linien dargestellten Lage gehalten.

In dieser Lage, der Ruhelage, findet kein Stromschluss statt und befindet sich somit auch der Motor in Ruhe.

Will jedoch der Wärter am betreffenden Blockposten den Motor in Wirksamkeit setzen, so verschiebt er den Umschalter von rechts nach links. Der Strom geht von B + über 6 U_3, 3, x, M_4, C_3 zu B — zurück. Der Motor arbeitet als Serienmotor. Sobald der Wärter den

Fig. 7.



Umschalter loslässt, kehrt er, durch die angedeutete Spiralfeder getrieben, in die ursprüngliche Lage zurück. Soll das Signal von dem entfernten Wärter gestellt bezw. der Motor in die entgegengesetzt drehende Bewegung gebracht werden, so stellt dieser Wärter den Umschalter U_4 auf 8. Der Strom geht von B + über 6, U_3, 4, E, E_1, U_4, 8 bis zu y, teilt sich hier und geht einerseits über C_3, andererseits über M_4, U_3, 2, z zu B — zurück. Der Motor wirkt sohin als Nebenschlussmotor entgegengesetzter Drehrichtung. Der mit R bezeichnete, in die Nebenschlussleitung eingeschaltete und zweckmässig zum Regulieren eingerichtete künstliche Widerstand hat den Zweck, die durch Parallelschaltung der Feldmagnetwickelung und des Induktors bei der Nebenschlussstellung gesetzmässig auftretende Widerstandsverminderung auszugleichen.

Digitized by Google

Auf Grundlage dieser beiden gesetzlich geschützten Anordnungen wurden nun die Triebwerke mit direktem elektrischem Antriebe gebaut. Von diesen Triebwerken gelangen zwei verschiedene Typen zur Anwendung, deren eine, weil sie in der Regel die Abhängigkeit zwischen den einzelnen Blockposten bedingt, als Blockapparat bezeichnet werden soll. Diese Type verfolgt nebstbei den Zweck, dem bedienenden Wärter eine Kontrolle über die jeweilige Lage der Semaphore zu geben, was durch Erscheinen von weisser oder roter Blendung hinter einem die Einsicht gestattenden Fensterchen erreicht wird, und ferner auch durch Umstellung von mit dem Triebwerk verbundenen Umschaltern die Abhängigkeit zu dirigieren. Bei der zweiten Type, welche ganz ähnlich angeordnet ist, steht das Triebwerk noch mit dem Semaphorarme in Verbindung und hat die Aufgabe, denselben nach Massgabe der erhaltenen Anregung auf „Halt" oder „Frei" umzustellen, es wird derselben demnach eine grössere Arbeitsleistung zugemutet als der ersten Type, weshalb sie entsprechend robuster gebaut werden muss. Die zweite Type wird demnach hier nur als Signalstellwerk oder kurz als „Stellwerk" bezeichnet werden.

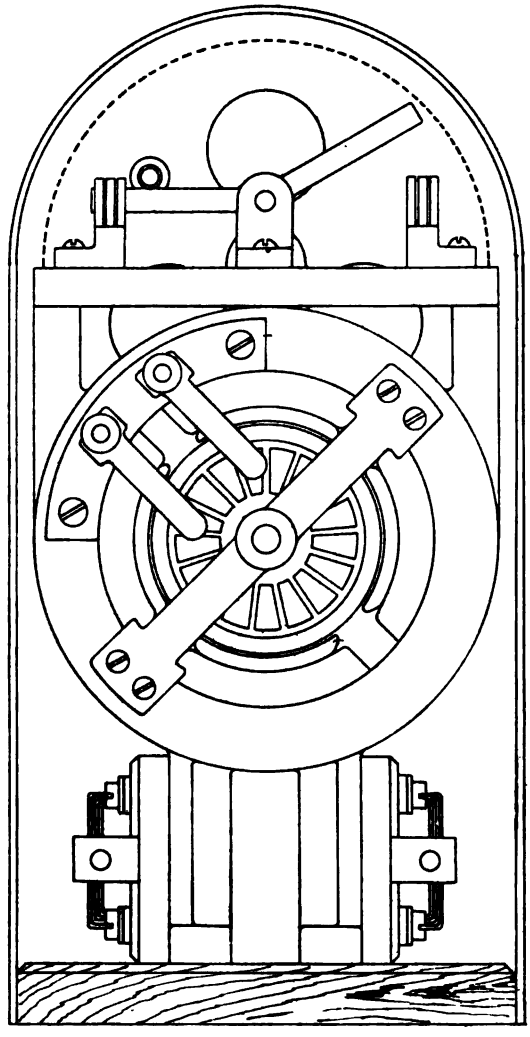
Der prinzipielle Unterschied zwischen den beiden Vorrichtungen besteht nur darin, dass für das Stellwerk eine doppelte Untersetzung angeordnet wurde, mit welcher der Stellmechanismus für den Semaphor in Verbindung gebracht ist.

Der eigentliche Blockapparat, welcher bei jedem Blockwärter, entweder im Inneren oder an der Aussenseite des Gebäudes angebracht ist, erscheint in Fig. 8 und 9 in Vorder- und Seitenansicht in ungefähr $^1/_2$ der natürlichen Grösse dargestellt und besteht der Hauptsache nach aus dem umsteuerbaren Elektromotor, welcher in einfacher Uebersetzung das Zahnrad antreibt. An diesem Zahnrade ist an der Vorderseite, hier nicht sichtbar, eine zur Hälfte weiss, zur anderen Hälfte rotgestrichene Scheibe befestigt, von welcher jedoch nach aussen durch ein Fensterchen stets nur eine dieser Farben sichtbar wird, wodurch eben die zwei Signalbegriffe „Halt" und „Frei" durch Erscheinen von rot oder weiss zum Ausdrucke gelangen. In die Rückseite des Zahnrades ist der Bolzen isoliert angebracht, welcher den Umschalter bethätigt. Dieser Umschalter, welcher aus einem um eine Achse drehbaren Winkelhebel und den federnden Kontakten besteht, ist in allen seinen Teilen am Motorengehäuse isoliert befestigt. Die Achse dieses Winkelhebels ist mit der stromführenden Leitung verbunden, um den Strom bei Stromentsendung in die Leitung, je nach

Digitized by Google

der Stellung des Hebels, in den rechten oder linken Federkontakt zu leiten und erst von da in die bestimmte Richtung zu dirigieren. Das Zahnrad vermag sich in jeder Bewegungsrichtung nur um 180° zu

Fig. 8.

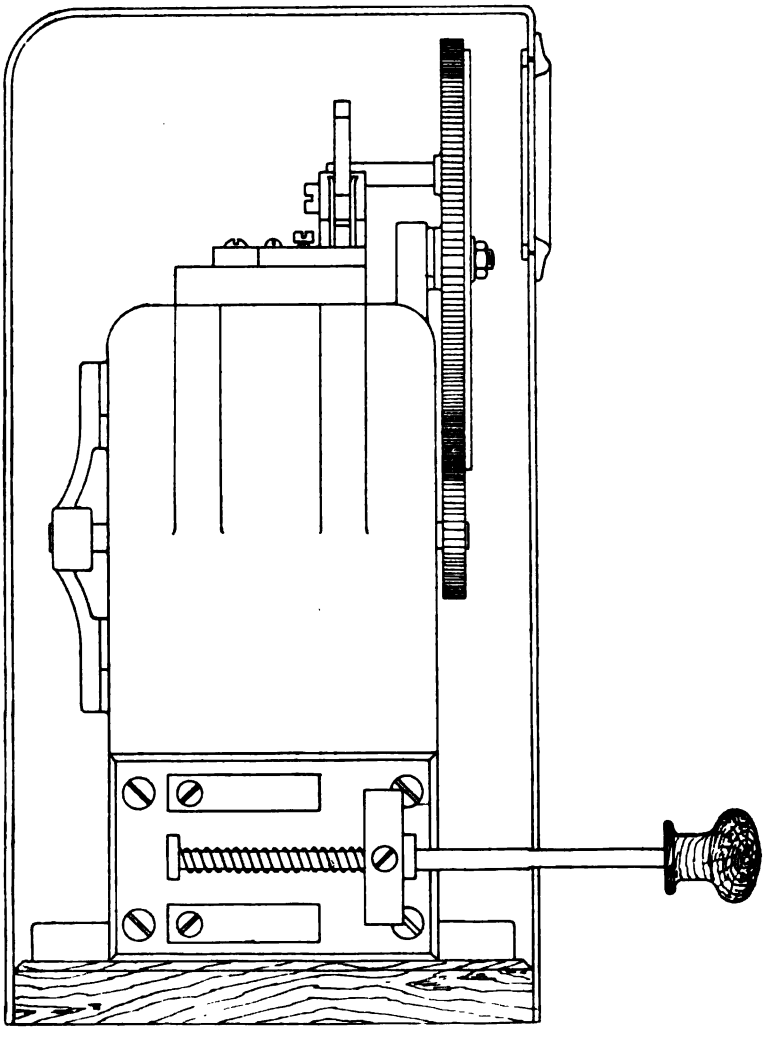


drehen, indem es nach Einlangen an der vorgeschriebenen Endstellung durch Anschlag an ein Hinderniss an der Weiterbewegung verhindert wird. Wie nun aus der Fig. 8 entnommen werden kann, verbleibt der Umschalter, selbst wenn sich das Zahnrad zu drehen beginnt, so

Digitized by Google

lange in der festgesetzten Lage, bis das Zahnrad die volle halbe Umdrehung nahezu vollendet hat, weil erst dann der Bolzen sich an den anderen Hebelarm anlegt und denselben in den Federkontakt hineindrückt und hiedurch die Umschaltung vollzieht.

Fig. 9.



Es wird sich sohin bei jeder Bewegung des Elektromotors das Zahnrad mit drehen und zwar insolange, als es die Grenze von 180° erreicht hat, gegen Ende dieser Umdrehung vollzieht es die Um-

Digitized by Google

stellung des Umschalters und entzieht hiedurch dem Elektromotor den Strom für diese Bewegungsrichtung, hiebei denselben gleichzeitig durch den Schluss des zweiten Kontaktes für die entgegengesetzte Bewegungsrichtung bereitstellend.

Unterhalb des Elektromotors, an dem gleichen Grundgestelle befestigt und aus dem Schutzgehäuse hervorragend, sind zwei von Hand zu bethätigende Schubtaster angebracht, welche durch Spiraldruckfedern stets in die Ruhelage zurückgeführt werden, sobald die äussere Einwirkung aufhört. Der eine dieser Taster hat den Zweck, dem bedienenden Wärter stets ein Mittel an die Hand zu geben, den eigenen Semaphor auf „Halt" stellen zu können, soferne sich die Notwendigkeit hiefür ergibt. Diese Taste ist normal unter einen geeigneten Verschluss gestellt, welcher nur im äussersten Notfalle beseitigt werden darf, um die Taste sodann bethätigen zu können. Diese Taste wird deshalb auch mit dem Namen „Nottaste" belegt.

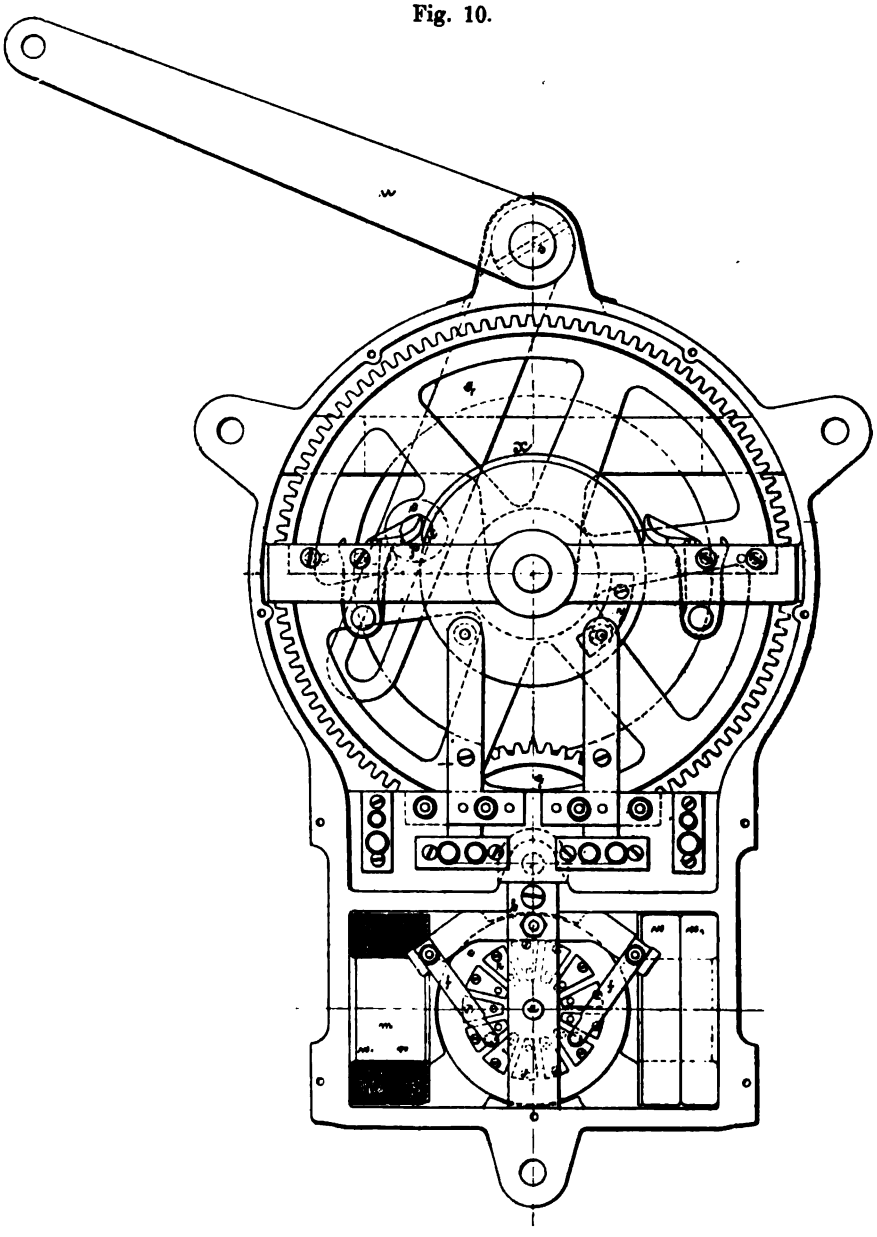
Auf den Zweck der anderen Taste, welcher je nach der Anordnung der Apparate und der gewählten Schaltungskombination ein verschiedener sein kann, wird erst bei Beschreibung der Apparatverbindungen zurückgekommen werden.

An dem eigentlichen Stellwerke, welches in Fig. 10 mit abgenommener Vorderwand des Schutzgehäuses, in Fig. 11 in Seitenansicht dargestellt ist und dessen schematische Anordnung Fig. 12 zeigt, ist die Vorrichtung zur Uebertragung der rotierenden Bewegung des Elektromotors bezw. des Zahnradgetriebes in die hin- und hergehende oder pendelnde Bewegung des Semaphorarmes wegen ihrer Einfachheit bemerkenswert.

Die an der Achse des Zahnrades Z (Fig. 12) befestigte Kurbel K greift mit ihrem Zapfen in den Schlitz i des um S drehbaren Winkelhebel P L ein, und zwar so, dass sich dieser Zapfen bei jedem Ende einer Umstellung an den oberen Rand des Schlitzes anlegt, wodurch nicht nur die Weiterdrehung der Kurbel und somit des gesamten Laufwerkes gehemmt, sondern auch das Laufwerk in einer Weise arretiert wird, dass der Semaphor durch einen Zug oder Druck von aussen nicht aus seiner Lage gebracht werden kann. Dies wird dadurch erreicht, dass die Kurbel K und der geschlitzte Arm P bei jeder Endstellung in rechtem Winkel zu einander stehen, sohin jeder auf P bezw. L ausgeübte Zug oder Druck an dem Widerstande der Kurbelachse O_2 sich bricht. Der Umstellung des Signalarmes durch die Drehbewegung des Motors steht hiedurch, wie sich sofort aus der Betrachtung der Fig. 12 ergibt, kein Hindernis entgegen. Es erfolgt somit die Um-

Digitized by Google

Fig. 10.

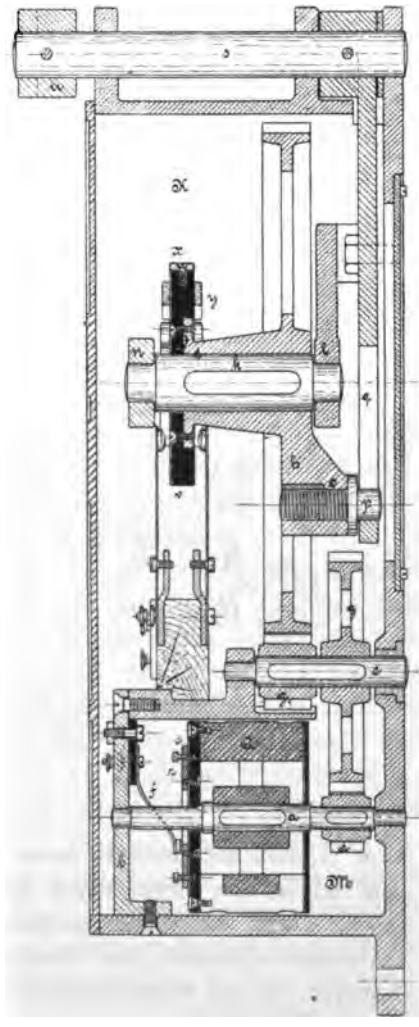


stellung des Semaphores und die Festlegung desselben in der Endlage ohne Anwendung irgend eines Zwischenmechanismus einfach durch die Uebertragungsvorrichtung selbst.

Digitized by Google

Wie bei dem eigentlichen Blockapparate, gelangt auch hier ein Umschalter zur Anwendung, welcher den doppelten Zweck verfolgt, den Strom für die eine Drehrichtung nach Vollendung der Umdrehung ab- und gleichzeitig für die entgegengesetzte Drehrichtung die Verbindung zwischen Leitung und Motor herzustellen. Dieser Umschalter, welcher auch in Fig. 10, jedoch in anderer Form, zur Ansicht gelangt, ist in Fig. 13 schematisch dargestellt. Die beiden um getrennte Achsen drehbaren Hebel I und II sind durch eine gelenkartig verbundene, von denselben aber vollkommen isolierte Querstange S in gegenseitige Abhängigkeit gebracht, so dass jeder dieser beiden Hebel der Bewegung des anderen zwangläufig folgen muss. Die beiden unteren mit Kontaktpunkten versehenen Enden derselben stehen bei einer der beiden Endlagen entweder mit den Kontakten 1 und 3 oder 2 und 4 in leitender Verbindung. Der gesamte Umschalter ist auf einer isolierenden Unterlage aufmontiert. An der Achse des Winkelhebels L, welcher mit dem Semaphorarme durch eine Zugstange verbunden ist (Fig. 12), befindet sich, in das Innere des Stellwerkes hineinragend, ein zweiter Arm Q, welcher mit einem isolierten Bolzen fest verbunden ist. Dieser Bolzen legt sich nun je nach der Endlage entweder an den Hebel I oder II des Umschalters an. Nachdem nun der Hebel Q und mit ihm der isolierte Bolzen die Bewegung des Armes L bei Umstellung des Signalwerkes mitmachen muss, so wird dieser Bolzen, bei der Drehung des Armes Q von rechts nach links, den Hebel II verlassen und sich erst gegen Ende seiner

Fig. 11.



Digitized by Google

Bewegung an den Arm I anlegen und denselben sodann so von rechts nach links verschieben, so dass der untere Teil desselben sich von 1 auf 2 anlegt. Durch die Querstange S wird nun notwendigerweise der Arm II gezwungen, sich von 3 an 4 anzulegen. Bei geeigneter Verbindung der Arme I und II, sowie der Kontakte 1, 2, 3, 4 mit den Leitungen und dem Motor kann, wie später aus dem Stromlaufschema zu ersehen ist, der beabsichtigte Zweck in einfacher und sicherer Weise erreicht werden.

Unter Anwendung dieser Blockapparate und Stellwerke kann nun die Bethätigung derselben in dreifacher Weise erfolgen und

Fig. 12.

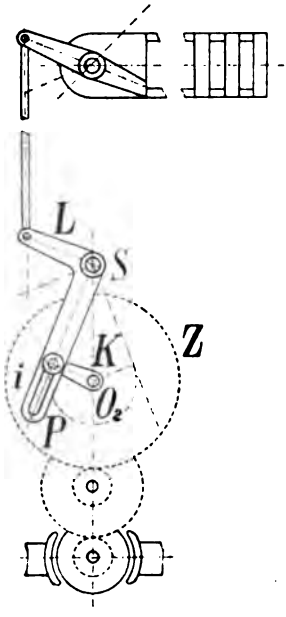
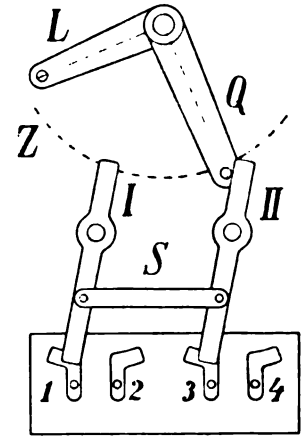


Fig. 13.



zwar 1. rein automatisch durch den vorbeifahrenden Zug selbst, indem selber den Strom durch geeignet angebrachte Schienenkontakte in der durch die Blocksignalisierung vorgeschriebenen Weise in die Leitungen entsendet, um durch denselben die Elektromotore dieser Apparate in der beabsichtigten Weise und Reihenfolge in Bewegung zu setzen; 2. durch rein menschliche Bedienung, indem die sonst durch den Zug selbstthätig hergestellten Stromschlüsse durch den bedienenden Wärter mittels geeigneter Umschaltevorrichtungen bewerkstelligt werden und 3. in kombinierter Weise, wobei die Bethätigung der Apparate durch den Zug selbst angeregt wird, es aber zu der-

Digitized by Google

selben der Zustimmung des bedienenden Wärters bedarf, welche durch gleichzeitige Bethätigung eines, zweckmässig mit einem besonderen Signale zwangläufig in Verbindung gebrachten Kontaktes erfolgt.

In allen diesen drei Fällen bedarf es jedoch der Anordnung von durch die vorbeifahrenden Züge zu bethätigenden Schienenkontakten, da ja auch in dem zweiten Falle eine gewisse Abhängigkeit zwischen Zug und Wärter geschaffen werden muss, um den letzteren zu verhindern, das zugehörige Signal vorzeitig, d. h. ehe der gesamte Zug die durch dasselbe abzuschliessende Blockstrecke verlassen hat, umzustellen.

Es bilden sonach diese Schienenkontakte einen integrierenden Bestandteil dieses Blocksignalsystems. Die Konstruktion derselben kann eine beliebige sein, sohin jede der bisher verwendeten Arten dieser Vorrichtungen in Gebrauch genommen werden, sofern nur der durch dieselben hergestellte Stromschluss so lange anwährt, bis die Umstellung des Blockapparates erfolgt ist. Da die Umstellung des eigentlichen Blockapparates im Maximum drei Sekunden erfordert, so wird eben der Kontaktschluss für die schnellsten der verkehrenden Züge mit dieser Zeitdauer zu bemessen sein. Ein längerer Kontaktschluss, wie solcher bei langsamen Zügen unbedingt stattfinden wird, bleibt, da sich der Blockapparat nach erfolgter Umstellung selbstthätig von der Kontaktleitung abschaltet, ohne Belang.

Vorrichtungen, welche allenfalls die Anbringung irgend eines Bestandteiles an der Lokomotive bedingen, empfehlen sich aus dem Grunde nicht, weil sonst alle diese Blockstrecken durchfahrenden Lokomotiven in gleicher Weise ausgerüstet werden müssen, was, da ja oft Lokomotiven verschiedener Bahnverwaltungen diese Strecken durchfahren, kaum durchführbar ist. Auch Quecksilberkontakte sind für diese Zwecke ausgeschlossen, weil bei den hier zur Anwendung gelangenden Strömen hoher Spannung leicht eine Verdampfung des Quecksilbers eintreten und hiedurch die sichere Funktionierung des Kontaktes beeinträchtigt werden kann. Hiegegen eignen sich isolierte Schienen für die Herstellung der Kontaktverbindungen ganz vorzüglich und wurden deshalb in den nachfolgenden schematischen Darstellungen der Stromläufe, nur solche als Kontaktvermittler ins Auge gefasst.

Die zur Bethätigung der Elektromotoren erforderliche Energiemenge beträgt ca. 150 Watt. Um nun die Leitungen nicht zu stark dimensionieren zu müssen, wurden Spannungen von 100 Volts für diesen Betrieb in Aussicht genommen, so dass unter Berücksichtigung eines hoch angenommenen Spannungsabfalles in den Leitungen von 10 %

Digitized by Google

ein Strom von ungefähr 0,2 Ampère in die Apparate einzuliefern sein wird.

Da für die Erzeugung solcher relativ kräftigen Ströme, galvanische Elemente, weil eine zu grosse Anzahl derselben benötigt würde und die Stromerzeugungskosten zu hohe wären, im Vorneherein ausgeschlossen sind, können als Stromerzeuger nur Dynamomaschinen und Akkumulatoren in Betracht gezogen werden. Dynamomaschinen müssten nun, um in ständiger Betriebsbereitschaft zu sein, ununterbrochen im Gange erhalten werden. Das Stromerfordernis tritt jedoch nur in gewissen Zeitabständen und da immer nur für einen sehr kurzen Zeitraum ein, so dass sich die Kosten des Betriebes durch den Leerlauf dieser Maschinen sehr hoch stellen würden. Selbe könnten daher nur dort angewendet werden, wo man über eine sehr billige Betriebskraft verfügt, oder wo diese Maschine für andere Zwecke in ununterbrochenem Betriebe gehalten werden muss, und den Strom für die Blocksignalisierung sozusagen als Nebenprodukt abgeben kann.

Da dies jedoch immerhin nur Ausnahmefälle sind, können für diesen Zweck nur Akkumulatorenbatterien allgemein in Betracht gezogen werden. Akkumulatorenbatterien zeigen ebenso wie die galvanischen Batterien stete Betriebsbereitschaft und haben, wenn gut erhalten, rechtzeitig nachgeladen und mit nicht zu grosser Intensität entladen, eine lange Lebensdauer. Die Schwierigkeit der Nachladung, die für jede Batterie einmal in 3 Wochen zu erfolgen hätte, lässt sich durch Errichtung einer mobilen Ladestation überwinden. Für vorstehende Zwecke wurde eine auf einer Draisine aufmontierte Ladestation konstruiert, bei welcher als Antriebsmaschine ein Benzinmotor verwendet wird, welcher durch Riemenübersetzung mit einer Radachse der Draisine gekuppelt ist, so dass der Motor gleich zum Antriebe der Draisine verwendet werden kann. Zum Zwecke des Ladens der Akkumulatoren wird die Draisine aus dem Geleise gehoben und an der Seite der gekuppelten Radachse so unterstützt, dass sich diese Achse samt den mit selber verbundenen Rädern frei drehen kann und diese Räder als Schwungräder wirken. Ueber eine zweite Riemenscheibe dieser Radachse wird nun ein Riemen gelegt und mit der Antriebsscheibe der auf der Plattform der Draisine aufmontierten Dynamo verbunden. Wird nun der Motor in Betrieb gesetzt und die Dynamomaschinenklemmen mit den Akkumulatoren durch ein flexibles Kabel unter Anwendung von Steckkontakten verbunden, so lässt sich die Nachladung in einfacher und rascher Weise durchführen. Die zur Feststellung der Stromstärke erforderlichen Volt und Ampèremeter

Digitized by Google

sind gleichfalls auf der Draisine aufmontiert. Der Benzinmotor entwickelt bei voller Tourenzahl normal 2 PS und die Dynamomaschine ist auf eine Leistung 8 Ampère bei 150 Volts gebaut.

Da die Akkumulatorenbatterie, welche aus 50 Zellen besteht, eine Kapazität von 32 Ampèrestunden besitzt, derselben aber selbst bei regem Zugsverkehr innerhalb von 3 Wochen kaum 8 Stundenampère entnommen werden, lässt sich die Nachladung innerhalb 2 bis 3 Stunden vollziehen, so dass eine mobile Ladestation für eine Ladung von 30 bis 40 solcher Batterien ausreicht.

Wiewohl es zweckmässig wäre, die Elektrizitätsquellen am Zuge selbst unterzubringen und den Strom von demselben aus zu entsenden, weil hiedurch diese Elektrizitätsquelle für die ganze zu durchfahrende Strecke ausreichen würde, so ist selbes doch aus dem schon angedeuteten Grunde, dass alle Züge derartig ausgerüstet werden müssten, praktisch nicht durchführbar.

Die Aufstellung der Elektrizitätsquellen bei den einzelnen Blocksignalposten würde wieder die Verwendung einer ebenso grossen Anzahl derselben bedingen, als solche Posten vorhanden sind. Wenn nun auch der Stromverbrauch hiedurch nicht erhöht werden würde, so verursacht die Beschaffung so vieler Elektrizitätsquellen ganz enorme Auslagen, und wäre deren Erhaltung und Wartung um so mehr mit Schwierigkeiten verbunden, als die örtlichen Verhältnisse nicht immer die bequeme Unterbringung der Batterien gestatten dürften.

Um diesem Nachteile der vielen Elektrizitätsquellen zu begegnen, wurde zum Prinzipe erhoben, dieselben nur in den die Blockstrecken abschliessenden Stationen unterzubringen und den einzelnen Blockposten den Strom durch eigene Leitungen, Stromzuführungsleitungen genannt, zuzuleiten. Diese Leitungen, von jeder Station je eine Leitung nach rechts und links ausgehend, durchlaufen jedoch nicht die ganze Strecke, sondern endigen bei jenem Blockposten, welcher am nächsten der Mitte der Gesamtstrecke liegt, so dass zwischen den beiden mittleren Blockposten keine Stromzuführungsleitung vorhanden ist, da ja der eine dieser Posten von der Station zur Rechten, der andere von der Station zur Linken mit Strom versorgt wird.

Von dieser Stromzuführungsleitung zweigen zu jedem Blockposten gesonderte Leitungen ab, die normal unterbrochen sind und erst durch die Bethätigung der Schienenkontakte oder Handumschalter oder auch beider geschlossen werden, die Zuführungsleitungen sind sonach normal stromlos.

Das Zusammenwirken aller einzelnen Teile dieses Blocksignal-

Digitized by Google

systems lässt sich aus den verschiedenen Stromlaufschemas, welche hier für jede einzelne Verkehrsphase eines die Blockstrecke durchfahrenden Zuges aufgerollt sind, am besten ersehen. Bevor jedoch an die Erläuterung der diesbezüglichen Darstellung geschritten werden kann, seien im allgemeinen die Grundbedingungen, welchen eine solche Blocksignalisierung zu entsprechen hat, vorgeführt, weil hiedurch das Verständnis der allgemeinen Anordnung sehr erleichtert wird.

Im allgemeinen ist daran festzuhalten, dass die Stationen nicht in die Blocksignalstrecke einbezogen sind, sondern diese Strecke erst unmittelbar hinter dem Ausfahrtssemaphor beginnt und am Einfahrtssemaphor der nächsten in der Fahrtrichtung gelegenen Station endigt. Die Stationen bilden sozusagen die Regulatoren des Verkehrs, weil in denselben alle Fäden desselben zusammenlaufen und die Organe derselben die Bedürfnisse und Erfordernisse desselben am besten zu ermessen vermögen. Die Stationen sind aber unter allen Umständen auch als Gefahrspunkte zu betrachten, und eben deshalb müssen dieselben mit allen Hilfsmitteln ausgerüstet sein, um den Gefahren vorbeugen zu können. Da die Züge an und für sich, sofern deren Folge und Richtung nicht genau reguliert wird, die Gefahren selbst bedingen, muss die Station deren Bewegung innerhalb des Stationsbereiches genau zu dirigieren vermögen, namentlich aber in der Lage sein, die Ein- bezw. Ausfahrt von Zügen jederzeit verbieten zu können. Da für die Einfahrt der Züge die Blockstrecke mit dem Einfahrtssemaphor abschliesst, somit die Station mit der Blockstrecke nur indirekt in Verbindung steht, muss auch die Freistellung des Einfahrtssemaphors in das Belieben der Station gestellt werden. Umgekehrt ist es mit dem Ausfahrtssemaphor, bei welchem die Blockstrecke beginnt. Sobald ein Zug den Ausfahrtssemaphor überfahren hat, tritt er in die Blockstrecke ein und darf demnach dieser Semaphor, welcher zur Deckung des Zuges gegen einen nachfolgenden Zug dient, so lange nicht wieder auf freie Fahrt gestellt werden können, bis der Zug die betreffende Blocksektion durchfahren und den Semaphor des ersten Streckenblockes passiert hat, in welchem Falle von dort aus die Freigabe des Ausfahrtssemaphors erfolgt. Nach erfolgter Freigabe muss die Station diesen Semaphor wieder nach Bedarf auf „Frei“ oder „Halt“ stellen können.

Die Wechselbeziehung zwischen den Streckenblocks untereinander gestalten sich wie folgt. Sobald ein Zug das eine Sektion abschliessende Signal überfahren hat, was doch nur bei vorhergehend gewesener Freilage desselben gestattet ist, muss dieses Signal auf „Halt“ gestellt

Digitized by Google

werden, um einem nachfolgenden Zuge den Eintritt in die nun besetzte Blocksektion zu verbieten. Gleichzeitig hiemit muss aber die Möglichkeit gegeben werden, das auf „Halt" stehende Abschlusssignal der vorhergehenden Blocksektion auf „Frei" zu stellen, weil ja durch den Austritt eines Zuges aus dieser Sektion der Einfahrt eines Folgezuges in dieselbe kein Hindernis mehr entgegensteht. Hier sind nun zwei Möglichkeiten vorhanden und zwar 1. dass das vorstehende Signal zwangläufig mit der Haltstellung des die Blocksektion abschliessenden Signales auf „Frei" gestellt, oder 2. dieses Signal in seiner ursprünglichen Lage so lange verharrt, bis es nicht durch den bedienenden Wärter des Folgesignales über Anfrage, ob die Einfahrt in die Blocksektion bereits gestattet sei, in die Freilage gebracht wird. Bezüglich der Zweckmässigkeit dieser zwei Möglichkeiten divergieren die Ansichten vielfach und wird namentlich seitens der Administrative die Freigabe unmittelbar vor Einfahrt des Zuges als zweckmässiger erklärt. Es erscheint jedoch viel logischer und richtiger, dieses Signal, welches ja auch als Bahnzustandssignal zu betrachten ist, sobald die Strecke wirklich frei ist, auf „Frei" zu stellen, indem einesteils die Möglichkeit eines unnötigen Aufenthaltes eines nachfahrenden Zuges vor dem Signal wegen verspäteter Anfrage und Freigabe beseitigt, und andernteils der bedienende Wärter hiedurch in positiver Weise benachrichtigt wird, dass die Strecke „frei" ist. Eine Gefahr, wie solche ängstliche Gemüter gerne herauszuklügeln suchen, kann hieraus um so weniger entstehen, als ja jeder Wärter in der Lage ist, sein Signal jederzeit wieder auf „Halt" zu stellen, und so, wenn er ein Hindernis gegen die Weiterfahrt des Zuges bemerkt, dieselbe zu verbieten. Die Zwischenvorgänge, welche sich auf der in dem einen und dem anderen Falle offenen Strecke abspielen, vermögen die beiden die Blocksektion abgrenzenden Wärter nicht zu beurteilen, da ihnen ja ein Ueberblick über die Strecke, seltene Ausnahmsfälle abgerechnet, gar nie möglich wird, sohin bei Eintritt eines Ereignisses auf dieser offenen Strecke Unfälle weder durch die eine noch die andere Anordnung abgewendet werden können.

Eine positive Bedingung nach Eintritt eines Zuges in die Blocksektion bleibt jedoch die, dass das betreffende diese Sektion abschliessende Signal nie früher auf „Halt" gestellt werden darf, ehe der letzte Wagen des einfahrenden Zuges das Signal überfahren hat, weil durch eine vorzeitige Haltstellung des Signales der Lokomotivführer des eben vorbeifahrenden Zuges irregeführt werden und den Zug zum Stillstand bringen könnte. Ein Folgezug, welcher bei

Digitized by Google

„Halt" gestelltem Signale unmittelbar vor dem Signale anzuhalten hat, könnte sohin immerhin an den letzten Wagen des stehenden Zuges anfahren und so eine oft weittragende Kollision herbeiführen. Diese Gefahr tritt allerdings nur bei sehr dichtem Zugsverkehre und dadurch bedingte geringe Länge der einzelnen Blocksektionen besonders deutlich hervor, ist aber auch bei längeren Blocksektionen dann nicht ausgeschlossen, wenn an der Lokomotive des stehenden Zuges ein Defekt auftritt, welcher ein An- bezw. Weiterfahren des Zuges unmöglich macht.

Kurz resumiert ergeben sich demnach für das Fahren in Raumdistanz folgende grundsätzliche Bedingungen, die von jedem brauchbaren Blocksignalsystem erfüllt werden müssen und zwar

I. Im allgemeinen. Ein Blocksemaphor darf, ausserordentliche Ausnahmsfälle ausgeschlossen, nie früher auf Verbot der Weiterfahrt oder „Halt" gestellt werden, bis nicht der letzte Wagen des zu deckenden Zuges diesen Semaphor überfahren hat, der ganze Zug sich sohin nur in einer Blocksektion befindet.

Die Freigabe eines Blocksemaphors darf nicht eher erfolgen können, als der die nächste in der Fahrtrichtung gelegene Blocksektion abschliessende Semaphor auf „Halt" gestellt ist.

II. Für die Ausfahrtsstation. Die Ausfahrtsstation muss den Ausfahrtssemaphor, welcher den Beginn der Blockstrecke abschliesst, wenn sich in der ersten hiemit beginnenden Blocksektion kein Zug befindet, jederzeit auf „Halt" und auch auf „Frei" stellen können. Hat jedoch ein in diese Blockstrecke einfahrender Zug diesen Semaphor überfahren und wurde selber auf „Halt" gestellt, so darf die Station die Freistellung desselben, so lange nicht vollziehen können, als der Zug nicht in die zweite Blocksektion eingefahren und das zugehörige Abschlusssignal auf „Halt" gestellt ist.

III. Für die Eingangsstation. Dieselbe muss den zum Einfahrtsblock zugehörigen Einfahrtssemaphor nach Bedarf jederzeit auf „Halt" und „Frei" stellen können, darf hiedurch aber nie den vorhergehenden Streckenblock beeinflussen.

IV. Für die Streckenblocks. Dieselben haben nach Vorbeifahrt eines Zuges den eigenen Semaphor auf „Halt" zu stellen und werden hiedurch in die Lage versetzt, den Semaphor des vorhergehenden Blockes „Frei" zu geben, oder dem Wärter dieses Blockes die Erlaubnis zu dieser Freigabe zu erteilen. Ein einmal auf „Halt" gestelltes Signal darf durch den eigenen Wärter niemals wieder auf „Frei" gestellt werden können, und ist hiezu die Erlaubnis durch den

Digitized by Google

nächstfolgenden Wärter unbedingt erforderlich. Diese gegenseitige Abhängigkeit der Blockwärter muss eine absolute sein. Als Ergänzung zu dieser Bedingung ist es weiters von grossem Werte, dass eine Freigabe des rückwärtigen Semaphors ausgeschlossen ist, wenn der betreffende Wärter seinen eigenen Semaphor aus irgend einem Grunde auf „Halt" gestellt hat, ohne dass ein Zug den betreffenden Blockposten passierte.

Diese letzte Bedingung setzt eine gewisse Abhängigkeit vom Zuge voraus, die nicht bei allen Blocksignalsystemen vorgesehen ist.

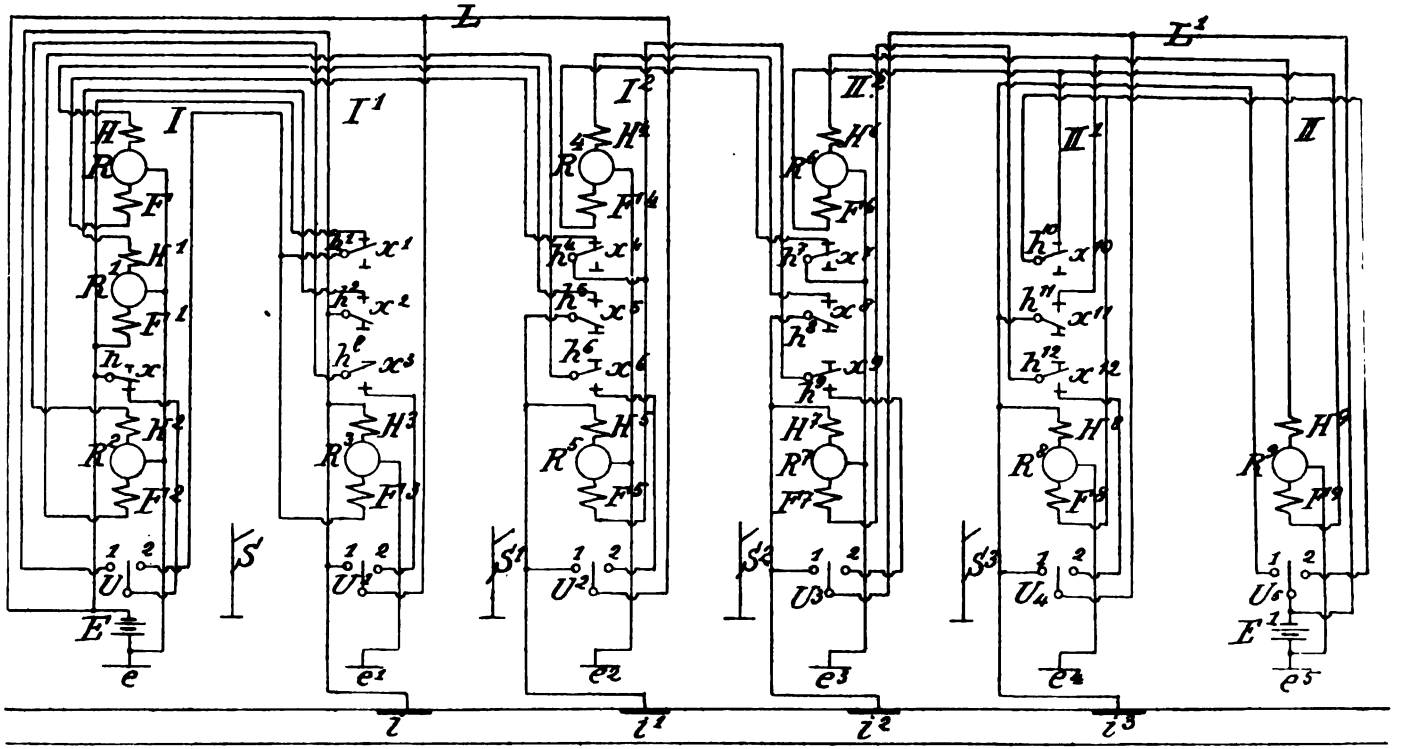
Inwiefern nun bei dem Blocksignalsytem von Krizik den hier festgelegten Bedingungen entsprochen ist, lässt sich aus den in den Figuren 14, 27 und 43 dargestellten Schaltungsschematas am besten erkennen.

Im folgenden sollen nur drei der zahlreichen Anordnungen, wie solche geschaffen wurden, zur Beschreibung gelangen, in welchem sich die Flexibilität dieses Systemes und sohin dessen Anpassbarkeit an die verschiedensten Anforderungen sofort erkennen lässt.

Die Fig. 14 bis 26 zeigen die schematischen Darstellungen einer Anordnung, bei welcher die Bethätigung der Apparate durch eigene Blockwärter erfolgt. In dieser Darstellung ist die Ausgangsstation mit I, die Einfahrtsstation mit II, der Ausfahrtsblock mit I^1, der Einfahrtsblock mit II^1, die beiden zwischenliegenden Streckenblocks mit I^2 und II^2 bezeichnet. Hier sind in der Ausgangsstation 3 beim Ausfahrts- und Einfahrtsblock und in der Einfahrtsstation je 1, bei den beiden Streckenblocks je 2 rotierende Laufwerke vorgesehen. Die Induktoren oder Rotoren dieser Blockapparate sind mit R—R^9, die zugehörigen Magnetwickelungen, je nachdem sie bei Durchgang des Stromes die Halt- oder Freistellung bewirken, mit H—H^9 bezw. F—F^9 bezeichnet. Die zu jedem Laufwerke zugehörigen automatischen Umschalter, von denen bis zu drei an der Zahl pro Laufwerk zur Anwendung gelangen, sind immer unmittelbar ober jenem Laufwerke gezeichnet, von welchem selbe bethätigt werden. Die Hebel dieser Umschalter sind der Reihenfolge nach mit h—h^{12}, die zugehörigen stromführenden Kontakte mit x—x^{12} bezeichnet. Hervorzuheben ist ferner noch, dass die Laufwerke, deren Rotoren mit R^3, R^5, R^7 und R^8 bezeichnet sind, die zugehörigen Semaphore S—S^3 bethätigen. Die jeweilige Stellung der Laufwerke ist dadurch gekennzeichnet, dass die Kreisfläche der zugehörigen Rotoren für die „Freistellung" weiss gelassen, für die „Haltstellung" schraffiert wurde. Die von Hand durch den Wärter zu bethätigenden Umschalter sind mit U—U^5 bezeichnet.

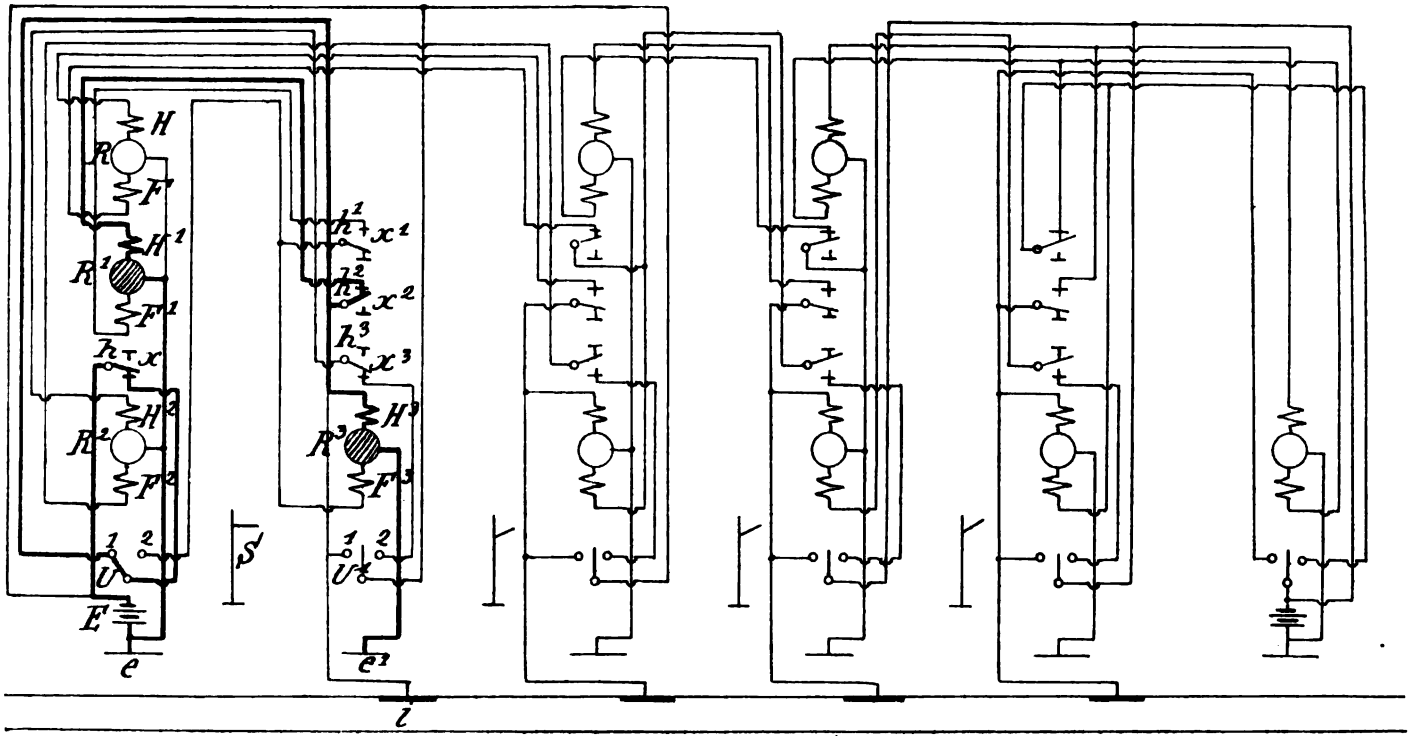
Digitized by Google

Fig. 14.



Digitized by Google

Fig. 15.



Digitized by Google

Fig. 16.

Digitized by Google

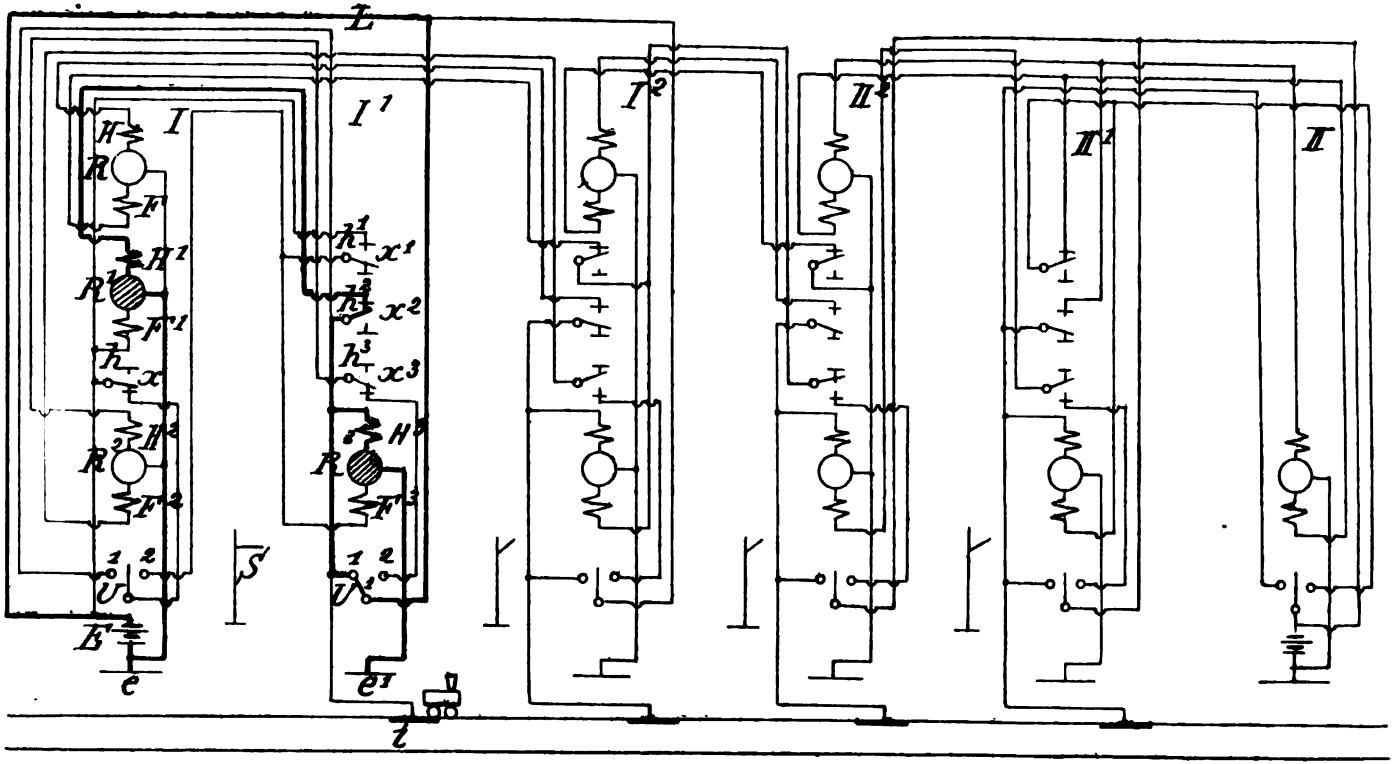
E und E^1 sind die Stromquellen, e—e^5 die Erdverbindungen, i—i^3 isolierte Schienen und L und L^1 die Stromzuführungsleitungen. Diese Bezeichnungen sind nur in Fig. 14 vollständig zur Anwendung gebracht, während selbe in den folgenden Figuren nur für die in Funktion befindlichen Teile vorgemerkt, für die übrigen Teile aber weggelassen sind. Der jeweilige Stromverlauf in all den verschiedenen Phasen ist durch bedeutend verstärkte Linien hervorgehoben, so dass er leicht zu verfolgen ist.

Fig. 14 stellt nun jene Situation dar, bei welcher sich kein Zug auf der Strecke befindet, somit alle Blockapparate, sowie alle Semaphore die Freilage einnehmen. In Fig. 15 stellt die Station den Ausfahrtssemaphor auf „Halt". Der Strom der Stromquelle E geht über h, x, U, 1 zu H^3, R^3, e^1 und kehrt von da über e zu E zurück. Der Stellapparat gelangt zur Funktion, stellt den Semaphor S auf „Halt" und gleichzeitig werden die Hebel der Umschalter von h^1, h^2, h^3 umgelegt, so dass die Verbindung von h^1 mit x^1 unterbrochen, hingegen die Verbindung von h^2 mit x^2 bezw. von h^3 mit x^3 hergestellt wird. Durch die Umlegung dieser Hebel geht nunmehr der Strom von E über h, x, U, 1 in Abzweigung zu h^2 über x^2 zurück zu H^1 durch R^1 und findet über diesen seinen Schluss. Das mittlere Laufwerk der Station dreht sich auf „Halt" und zeigt, wie dies durch Schraffierung von R^1 angedeutet ist, der Station zur Kontrolle an, dass sich der Ausfahrtssemaphor thatsächlich auf „Halt" gestellt hat. Will nun die Station das Signal neuerdings auf „Frei" stellen, so legt sie den Umschalter U auf P 2 (Fig. 16). Der Strom nimmt den durch die starke Linie gezeichneten Verlauf durch die Freiwindung und den Rotor des Stellwerkes des Ausfahrtssemaphors, wodurch letzterer sich auf „Frei" stellt. Erst bei vollständig erfolgter Umdrehung des Laufwerkes legt sich der Hebel h^1 an den Kontakt x^1 an, worauf der Strom im Nebenschluss das mittlere Laufwerk R^1 zur Kontrolle wieder auf „Frei" stellt.

Fährt ein Zug (Fig. 17) aus der Station und überfährt den Semaphor S, so hat der den Ausfahrtssemaphor bedienende Wärter den Umschalter U^1 und sohin den Semaphor auf „Halt" zu stellen. In gleicher Weise erhält die Station zum Zeichen dieser erfolgten Umstellung das Fensterchen des mittleren Laufwerkes rot geblendet. Ist diese Manipulation vollzogen, so legt der Wärter den Umschalter an P 2 (Fig. 18), wonach sich das unterste Laufwerk R^2 der Station auf „Halt" stellt und der Kontakt zwischen h und x unterbrochen wird. Die Station ist nunmehr, nachdem ihr der Stromweg zu

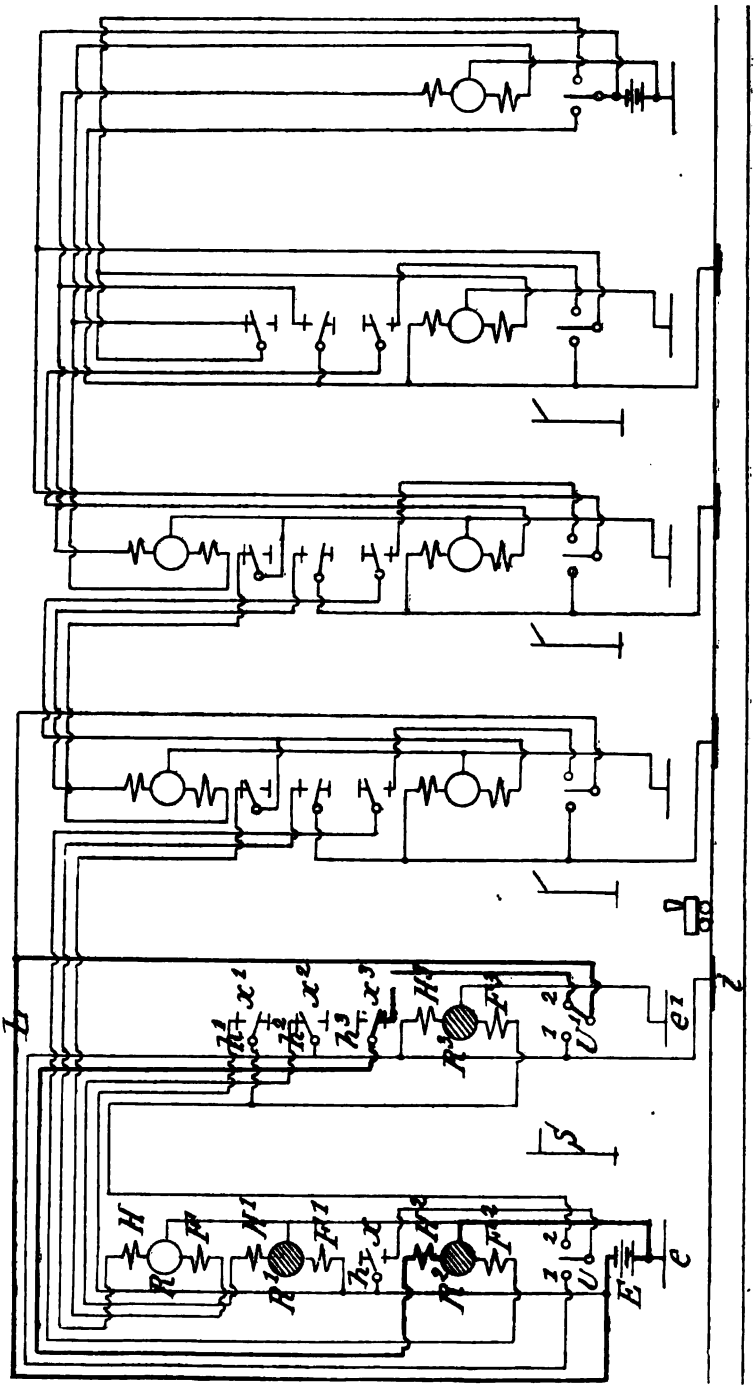
Digitized by Google

Fig. 17.



Digitized by Google

Fig. 18.



Digitized by Google

F^3 R^3 des Ausfahrtsblockes verschlossen ist, nicht mehr in der Lage, durch Umstellen von U auf 2 das Ausfahrtssignal auf „Frei" zu stellen. Hierbei ist sich eben stets vor Augen zu halten, dass jedes Laufwerk samt den zugehörigen selbstthätigen Umschaltern in ein nach aussen vollständig abgeschlossenes Gehäuse eingesetzt ist, sonach ein Eingriff in dasselbe unmöglich gemacht wird.

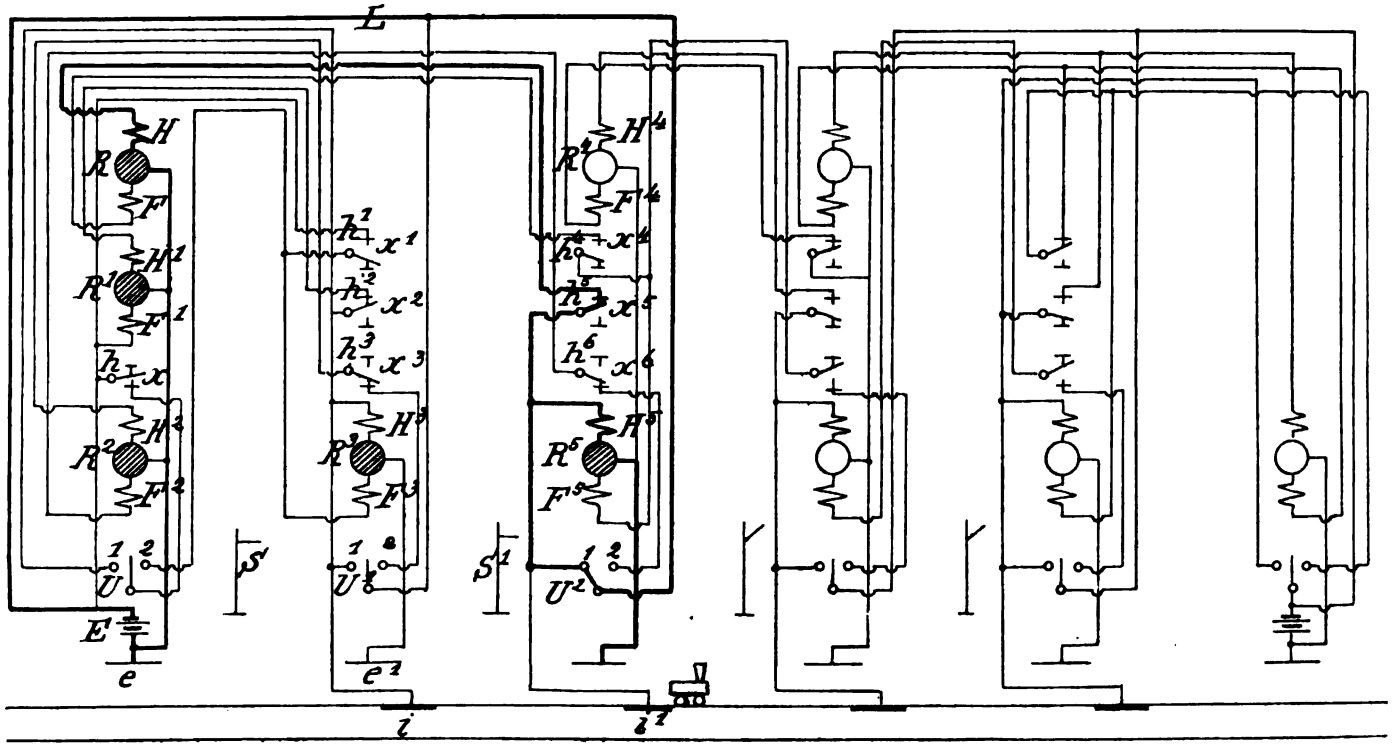
Die isolierten Schienen $i - i^3$ haben bei dieser Anordnung den Zweck, eine vorzeitige Umstellung des Signales, d. h. bevor der letzte Wagen des Zuges das Signal passiert hat, zu verhindern. Durch die Achsen und Räder der Wagen wird, so lange sich selbe auf der isolierten Schiene bewegen, eine leitende Verbindung mit dem gegenüberliegenden Schienenstrange und somit auch eine Erdverbindung, also auch ein Stromweg von geringerem Leitungswiderstande als der durch das Stellwerk gegebene, hergestellt, und hiedurch, selbst wenn der Umschalter auf Punkt 1 gelegt wird, die Umstellung des Signales so lange unmöglich gemacht, als dieser Nebenschluss besteht. Die durch das Stellwerk hindurchgehende Strommenge ist den Gesetzen der Stromverzweigung entsprechend viel zu gering, um das Laufwerk in Bewegung setzen zu können. Vorteilhaft ist es, um einen geringen Uebergangswiderstand zwischen den Schienen und der Erde zu erzielen, den Schienenstrang gegenüber den isolierten Schienen mit einer guten Erdleitung zu verbinden.

Gelangt der Zug in seinem weiteren Laufe zu dem ersten Streckenblocke, so stellt der Wärter desselben (Fig. 19) den Umschalter U^2 vorerst auf 1 und seinen eigenen Semaphor hiedurch auf „Halt". Nach vollendeter Umstellung legt sich der Hebel h^5 an x^5 an und der Strom geht in Abzweigung zur Ausgangsstation über H, R zur Batterie zurück. Das oberste Laufwerk blendet das Fensterchen rot und zeigt der Station hiedurch an, dass der erste Streckensemaphor auf „Halt" steht, eine Kontrolle, die zwar nicht absolut notwendig, aber doch von einigem Werte ist, weil der Zug im Vornehinein davon benachrichtigt werden kann, ob die Durchfahrt in die zweite Blockstrecke frei ist und der Lokomotivführer dementsprechend die Fahrgeschwindigkeit zu regeln vermag.

Nach vollzogener Haltstellung des eigenen Blocksemaphores und kurzem Zuwarten, damit das oberste Laufwerk der Stationseinrichtung sich umstellen kann, stellt der Streckenblockwärter den Umschalter U^2 auf Punkt 2 (Fig. 20), wodurch das unterste Laufwerk der Station auf „Frei" gestellt wird, dessen Fensterchen sich weiss blendet, und der Kontakt h sich wieder schliesst. Hiedurch ist auch den vorher fest-

Digitized by Google

Fig. 19.

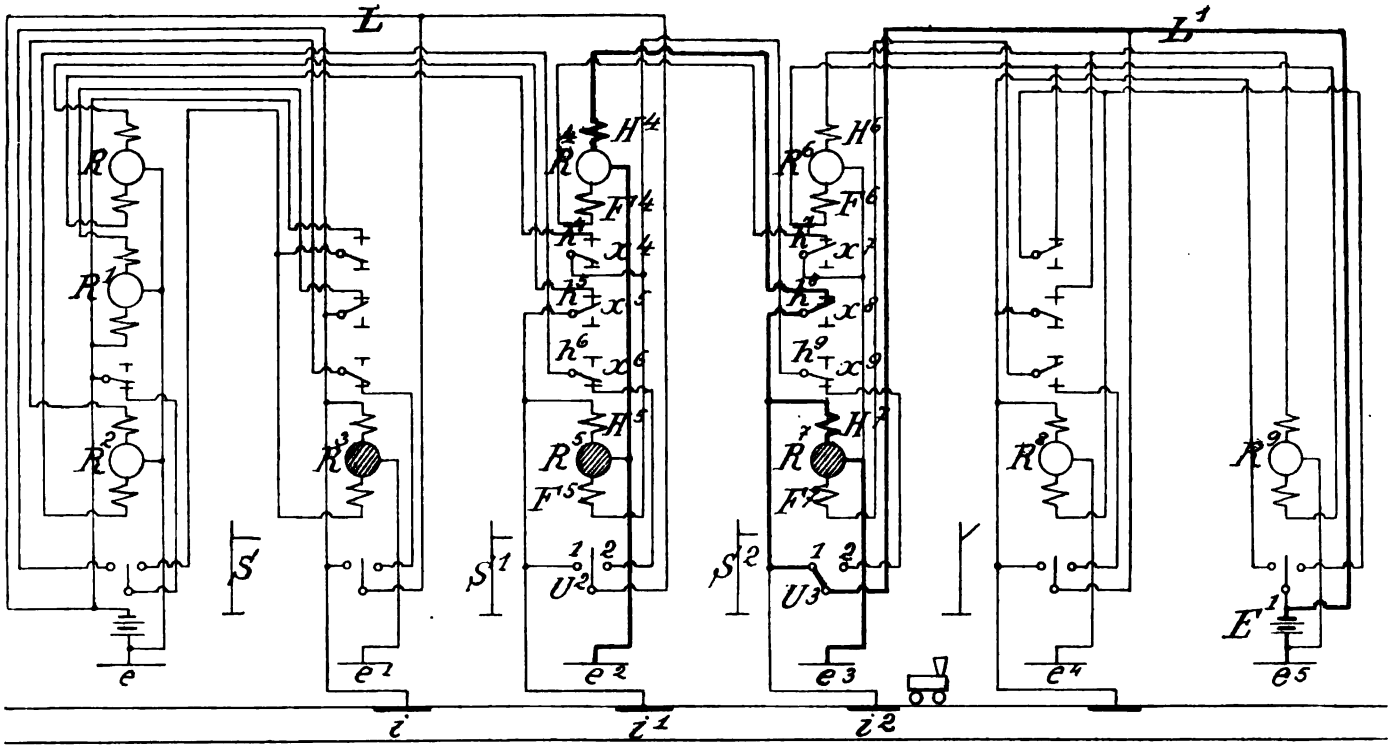


Digitized by Google

Fig. 20.

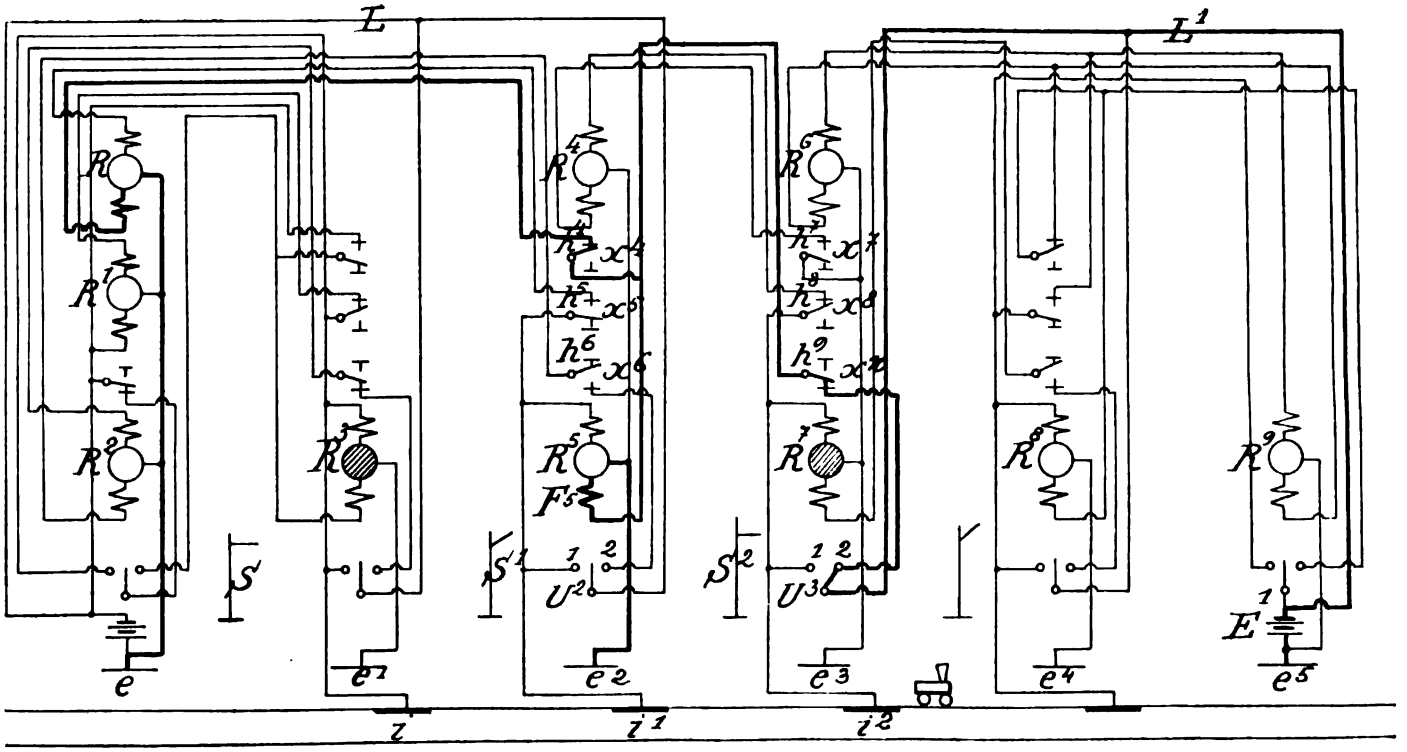
Digitized by Google

Fig. 21.



Digitized by Google

Fig. 22.



Digitized by Google

gelegten Grundsätzen für die Abhängigkeit des Stationsblockes vom ersten Streckenblocke Rechnung getragen, indem die Station nunmehr wieder den Ausfahrtssemaphor nach Bedarf auf „Frei" stellen kann.

Gelangt der Zug zum Streckenblock II, so wird durch Umstellen von U^3 auf 1 (Fig. 21) der Semaphor S^2 auf „Halt" gestellt und sodann im Nebenschlusse über den nunmehr zwischen $h^8\,x^8$ geschlossenen Kontakt das obere Laufwerk des Streckenblockes I umgestellt, das Fensterchen desselben rot geblendet und zeigt sohin dem Wärter dieses Blockes an, dass die Einfahrt in die zweitnächste Blockstrecke gesperrt ist. Durch Umstellen von U^3 auf 2 (Fig. 22) wird hierauf der Semaphor S^1 und sodann im Nebenschlusse über $x^4\,h^4$ das oberste Laufwerk R der Ausgangsstation auf „Frei" gestellt. Das Fensterchen des Laufwerkes R blendet sich weiss und die Ausfahrtsstation ist hiedurch in Kenntnis gesetzt, dass die Blockstrecke zwischen Streckenblock 1 und 2 frei ist. Für diese Stellungen gelangt, wie dies ja durch die verstärkten Linien hervorgehoben ist, bereits die Stromquelle E^1 der Eingangsstation durch die Stromzuführungsleitung L^1 zur Ausnützung.

Gelangt der Zug (Fig. 23) zum Einfahrtssemaphor, so stellt der Wärter vorerst seinen eigenen Semaphor auf „Halt", sodann im Nebenschluss über Kontakt $h^{11}\,x^{11}$ gleichzeitig das obere Laufwerk R^6 des Streckenblockes II und das Laufwerk der Station R^8 auf „Halt", hiedurch beiden zur Kontrolle der durchgeführten Haltstellung die Fensterchen dieser Laufwerke „rot" blendend. Fig. 24 zeigt wieder, wie der Semaphor des Blockposten II und das obere Kontrolllaufwerk des Blockposten I auf „Frei" gestellt wird.

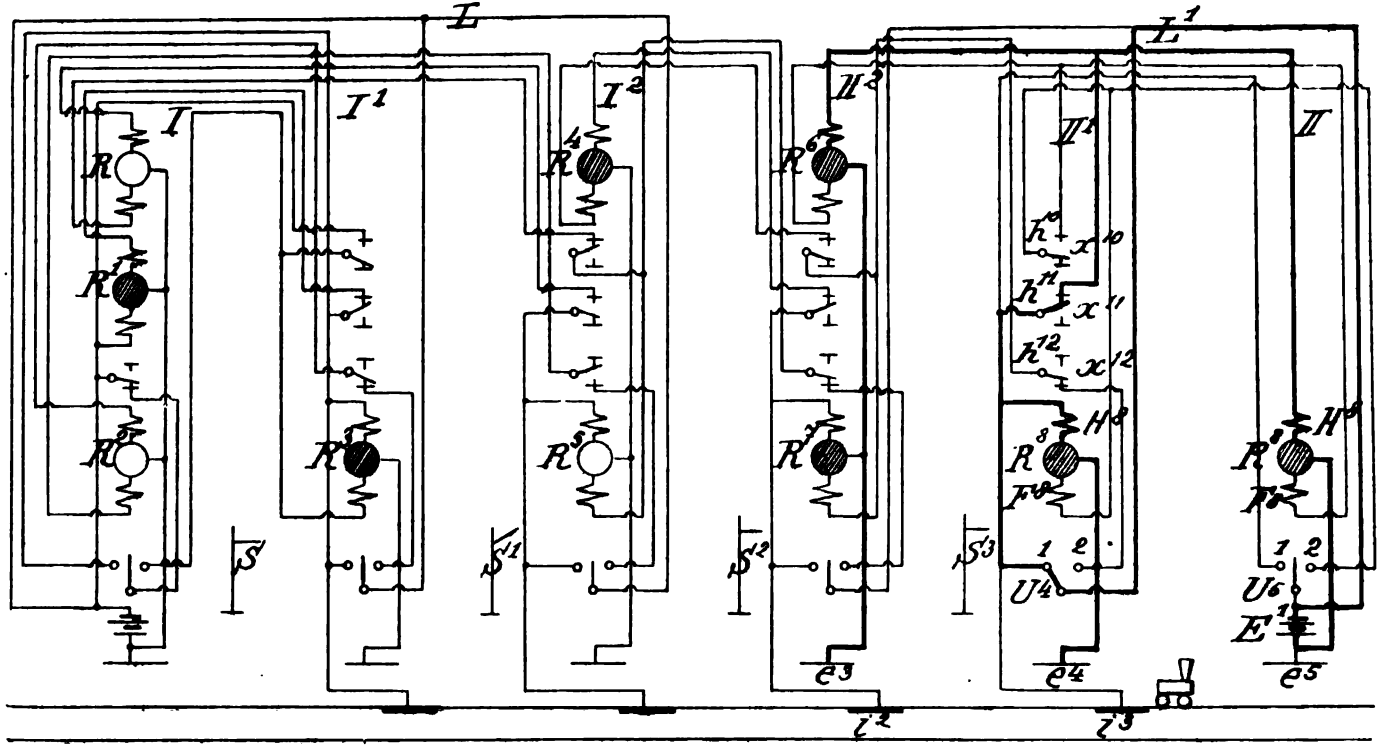
Die Durchführung der Manipulation in der Eingangsstation, um den Einfahrtssemaphor auf „Frei" und auf „Halt" zu stellen, sowie der Stromverlauf für beide Fälle ist ohne weitere Erklärung aus den beiden Fig. 25 und 26 zu erkennen und zeigt sich sofort, dass sowohl die Station als auch der Streckenblock II^2 von der jeweiligen Lage des Einfahrtssemaphors genau informiert werden.

Dass hier den Bedingungen einer sicheren Blocksignalisierung in allen Punkten entsprochen ist, bedarf bei eingehenderem Studium der bezüglichen Stromlaufschemas wohl keines weiteren Kommentares.

Bei der in den Fig. 27 bis 42 dargestellten Anordnung der Apparate und gegenseitigen Verbindung derselben, sind für die Ausgangsstation zwei, für die Eingangsstation, die beiden Streckenblockposten und den Einfahrtsblock jedoch nur je ein Blockwerk, und für die drei letzteren und den Ausfahrtsblock ausserdem noch ein direkt

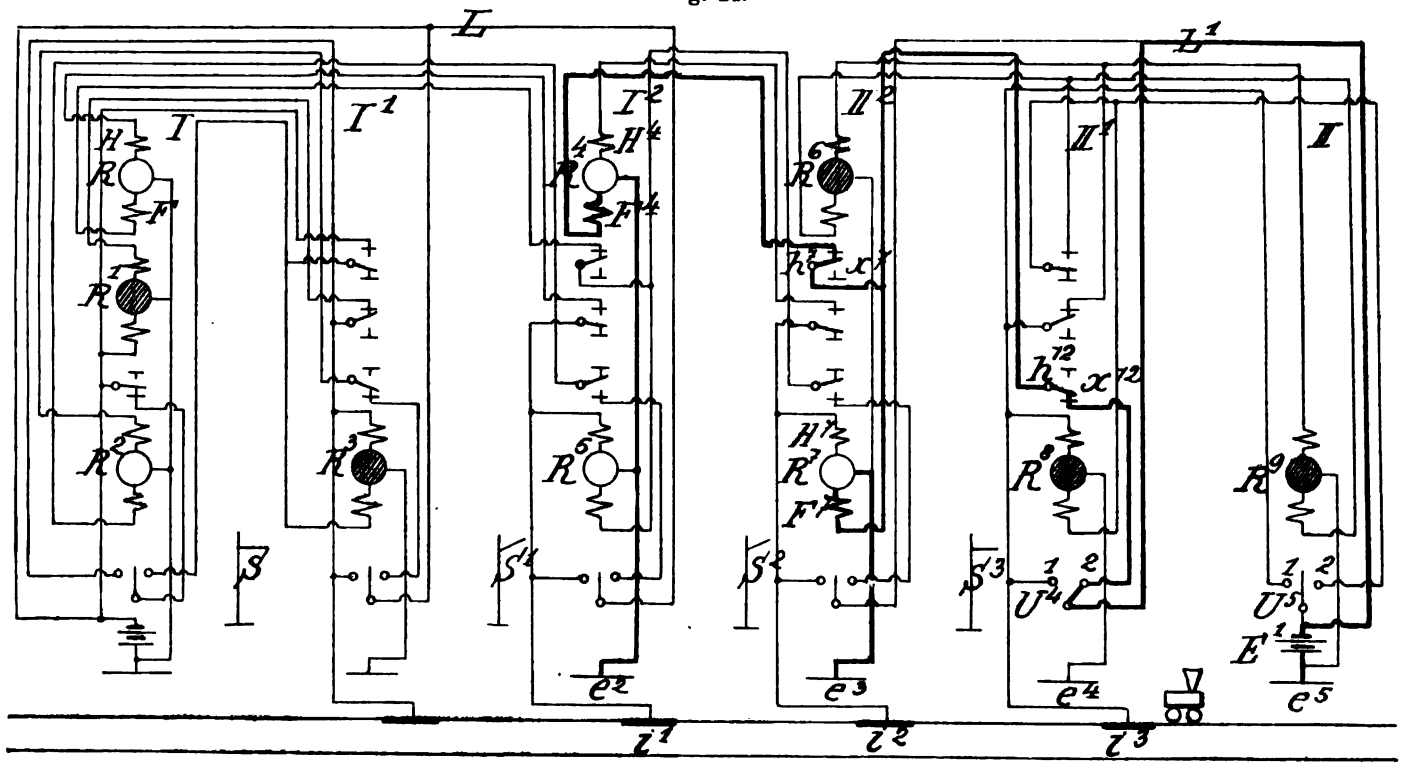
Digitized by Google

Fig. 28.



Digitized by Google

Fig. 24.

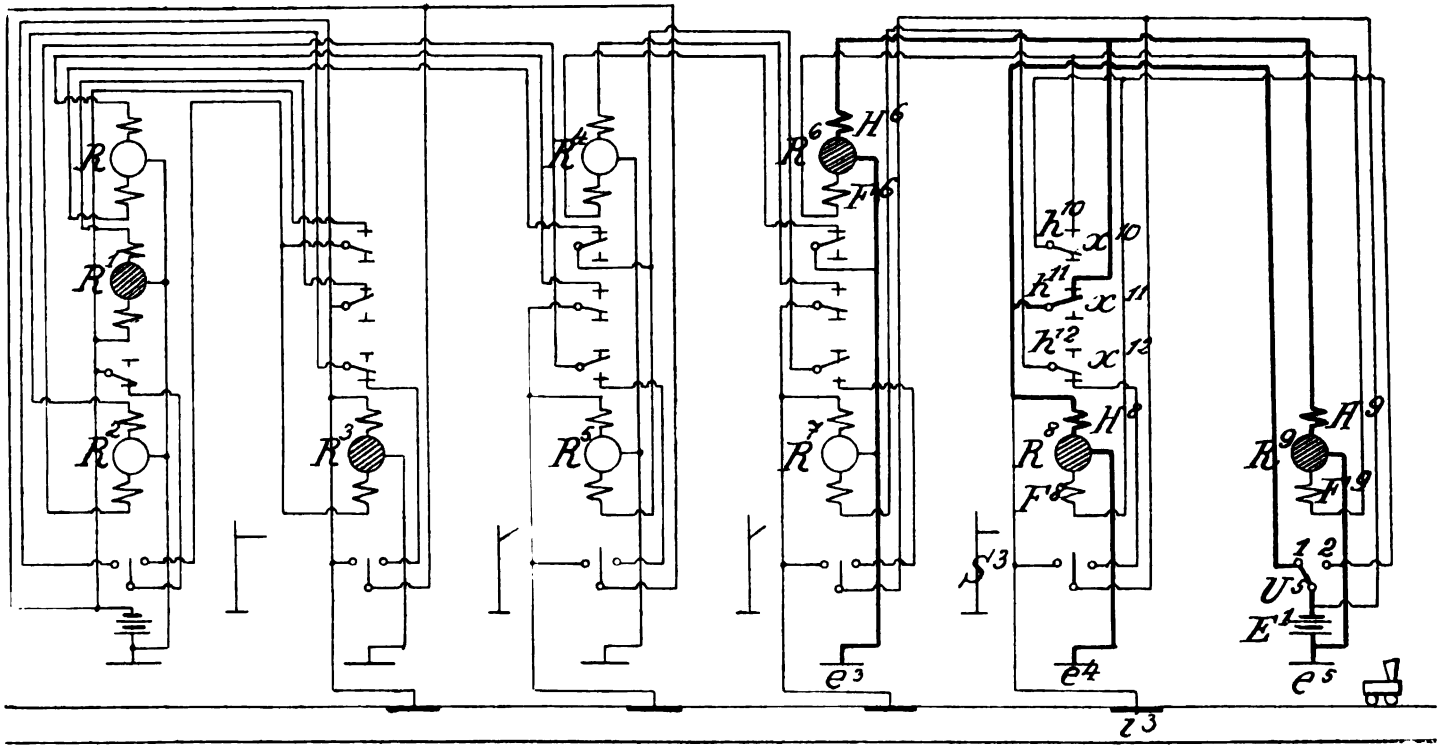


Digitized by Google

Fig. 25.

Digitized by Google

Fig. 26.



Digitized by Google

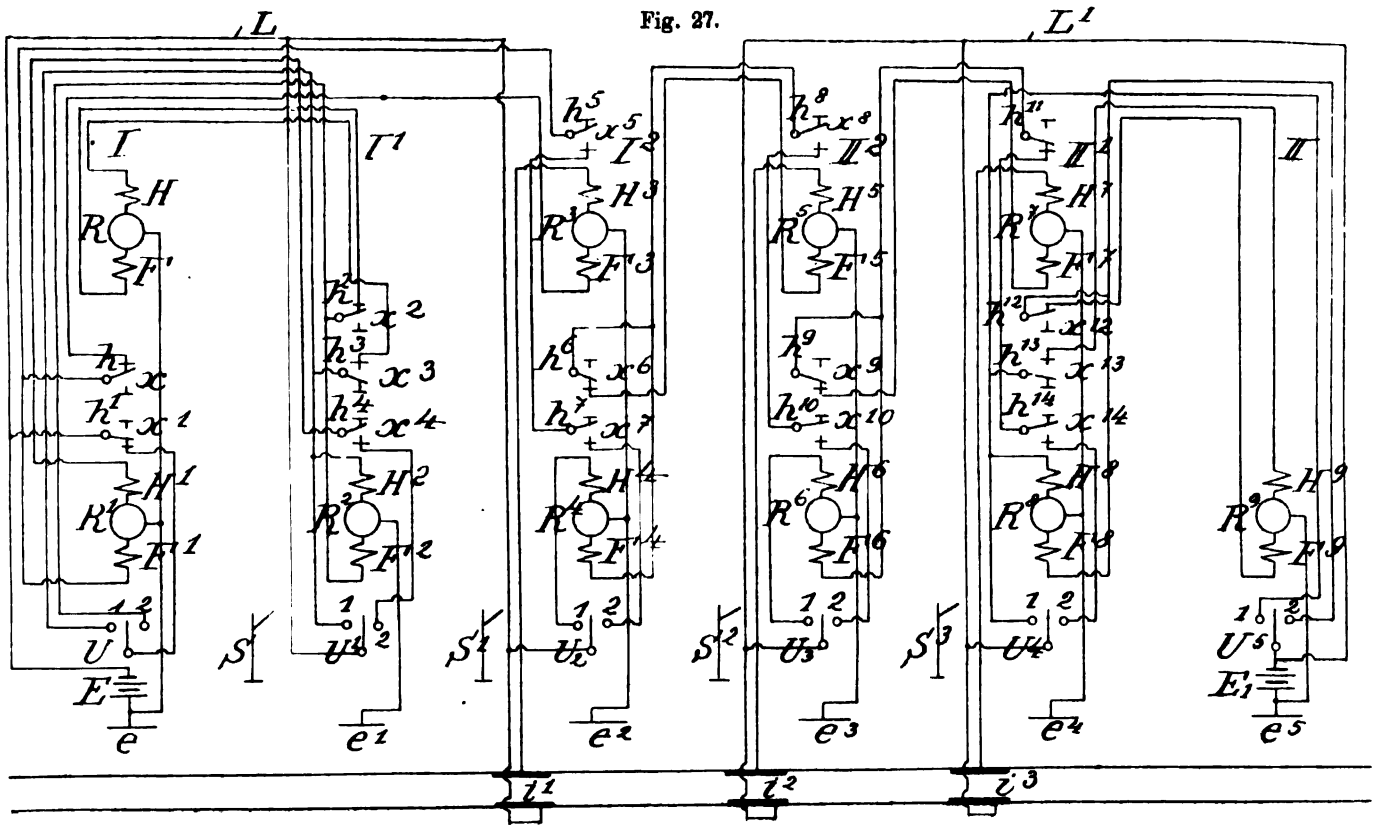
mit dem Semaphor gekuppeltes Stellwerk der beschriebenen Konstruktion vorgesehen.

Die Bezeichnung der einzelnen Teile wurde mit den in Fig. 14 bis 26 gewählten Bezeichnungen gleichgehalten, so dass es wohl keiner weiteren Erklärung derselben mehr bedarf. Auch bei dieser Anordnung erfolgt sowohl die „Halt"- als „Frei"stellung der Signale durch direkte Bedienung seitens der bei den Signalen postierten Wärter, doch liegt der Unterschied zwischen der vorangehend beschriebenen und jetzt zur Beschreibung gelangten Anordnung hauptsächlich darin, dass bei den einzelnen Signalposten in die laufenden Gleisstränge zwei einander gegenüberliegende isolierte Schienen eingelegt werden, die beide mit den Leitungen verbunden sind. Anstatt nun, wie dies bei der vorhergehenden Anordnung in Aussicht genommen war, die vorzeitige Umstellung des Signales, bevor der Zug die isolierte Schiene überfahren hat, durch Anordnung eines Nebenschlusses unmöglich zu machen, wird hier die Möglichkeit der Umstellung des vorhergehenden Signales auf „Frei" direkt von dem Befahren der beiden isolierten Schienen abhängig gemacht. Sobald nämlich der Zug die beiden isolierten Schienen befährt, werden dieselben durch die Achsen und Räder leitend verbunden, hiedurch stellt sich Stromschluss her und der in den bezüglichen Stromkreis eingebundene Blockapparat wird bethätigt und nimmt die in Fig. 32 dargestellte Lage ein, und erst hiedurch wird es möglich, durch Umstellen des Umschalters auf Punkt 2 nach rückwärts „Frei" zu geben. Hingegen vermag der Wärter den eigenen Semaphor, wenn kein Zug auf der Strecke ist, jederzeit in die Haltlage zu bringen, in welchem Falle ihm im Gegensatze zur Anordnung in Fig. 14 jedoch so lange die Möglichkeit benommen wird, nach rückwärts „Frei" zu geben, bis nicht ein Zug die beiden isolierten Schienen befahren und hiedurch den oberen Blockapparat auf „Halt" gestellt hat.

Fig. 27 zeigt wieder die Lage sämtlicher Apparate, wenn sich kein Zug auf der Strecke befindet. Will die Station (Fig. 28) den Ausfahrtssemaphor auf „Halt" stellen, so legt sie den Umschalter U auf Punkt 1. Der Strom geht von E über h^1, x^1, U in die Leitung durch H^2, R^2 über e^1, e zu E zurück. Das Stellwerk des Ausfahrtssemaphores dreht sich, stellt den Semaphor auf „Halt" und legt gleichzeitig die Hebel h^2, h^3, h^4 der mit dem Laufwerke verbundenen Umschalter in die bezeichnete Lage um. Nunmehr verläuft der Strom wie vor, teilt sich aber bei h^3 und kehrt über H, R zu E zurück und stellt den oberen Blockapparat zur Kontrolle, dass sich die Um-

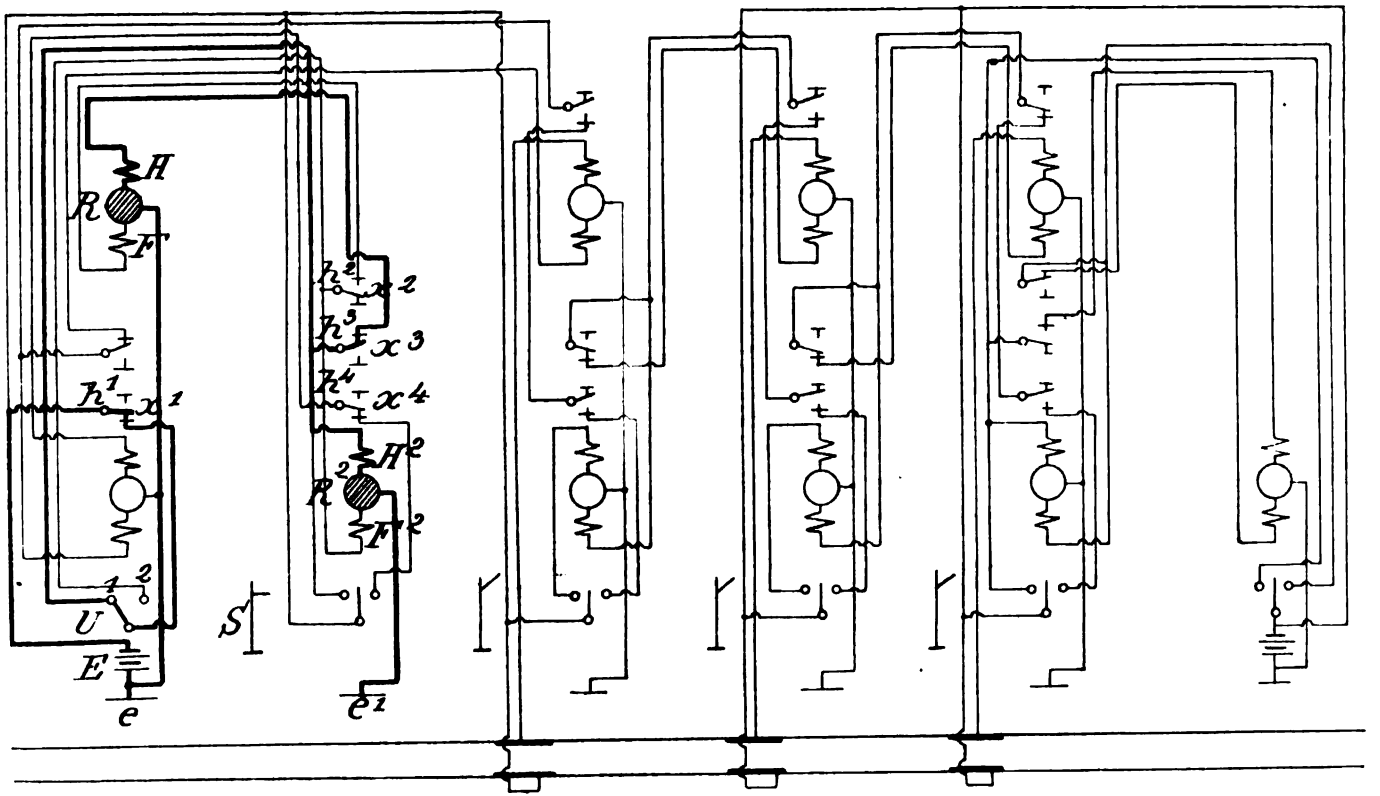
Digitized by Google

Fig. 27.



Digitized by Google

Fig. 28.



Digitized by Google

stellung des Ausfahrtssemaphores thatsächlich vollzogen hat, auf „Halt".

Die Station ist nunmehr in der Lage, den Ausfahrtssemaphor durch Umstellen von U auf 2 nach Bedarf auf „Frei" zu stellen (Fig. 29). Da nach erfolgter Freistellung des Semaphores auch die Hebel h^2, h^3, h^4 wieder in die daselbst bezeichnete Lage gebracht werden, geht der Strom im Nebenschluss über h^2, x^2, F, R zur Station zurück und stellt den oberen Stationsblock auf „Frei". Der Verfolg des Stromverlaufes bildet, da die stromdurchflossenen Leitungen auffällig hervorgehoben sind, wohl keine Schwierigkeiten mehr, weshalb im folgenden auf die Beschreibung des Stromweges verzichtet wird.

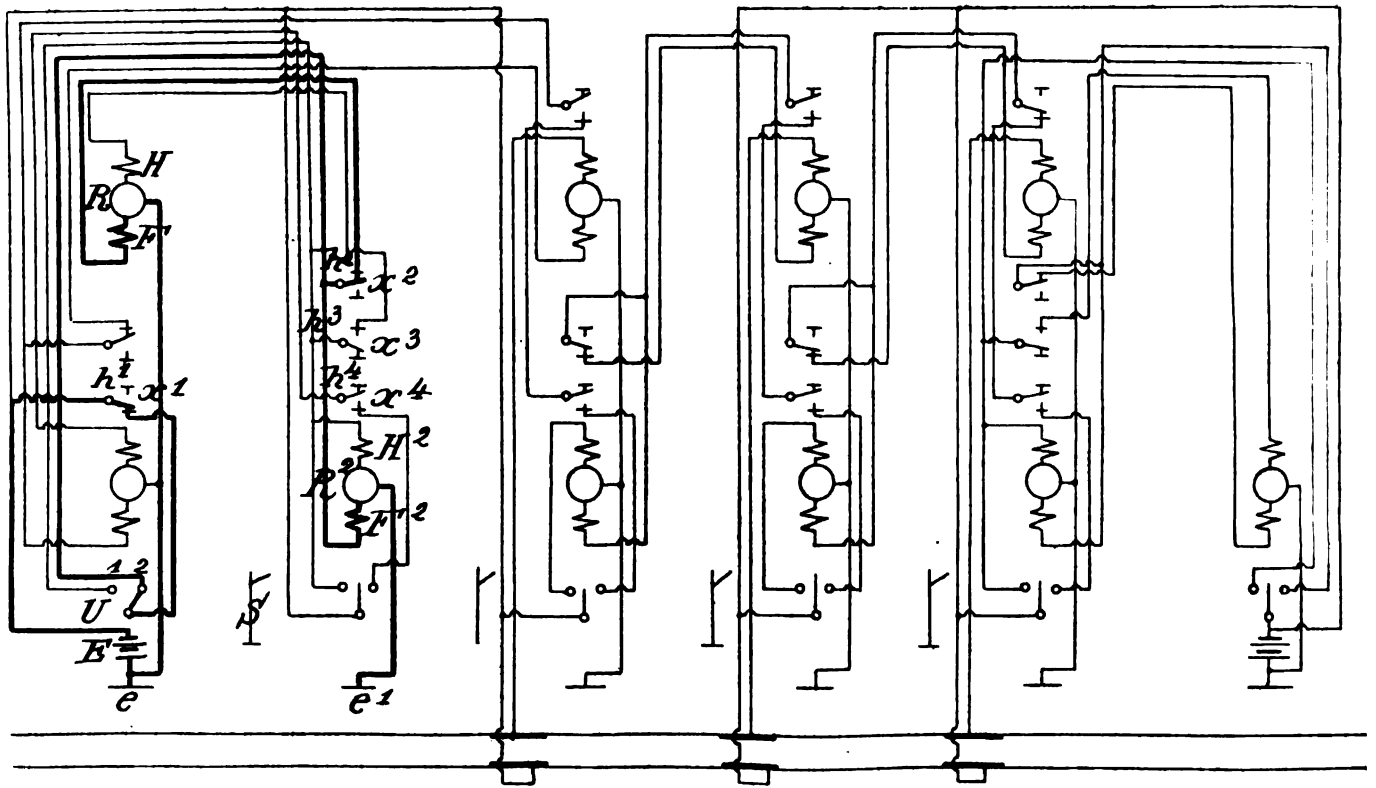
Sobald ein Zug den Ausfahrtssemaphor passiert hat, ist der Wärter beim Ausfahrtssemaphor verpflichtet, denselben vorerst durch Umstellen von U^1 auf 1 (Fig. 30) auf „Halt" zu stellen, wodurch auch der obere Blockapparat der Station zur Kontrolle auf „Halt" gestellt wird, und sodann durch Umstellen von U^1 auf 2 (Fig. 31) die Station zu blockieren. Der untere Blockapparat der Station stellt sich auf „Halt", und die Verbindung zwischen h^1 und x^1 sowie h und x wird unterbrochen. Durch die Unterbrechung zwischen h^1 und x^1 ist der Station die Möglichkeit benommen, bei Umstellen des Umschalters auf 1 oder 2 Strom in die Leitung zu entsenden, sohin auch den Ausfahrtssemaphor auf „Frei" zu stellen.

Sobald ein Zug die isolierten Schienen i^1 des ersten Streckenblockes überfährt, verläuft der Strom in der durch Fig. 32 bezeichneten Weise. Der Blockapparat des ersten Streckenblockes stellt sich auf „Halt", wodurch der Kontakt zwischen h^5 und x^5 geschlossen wird. Sobald der Zug die beiden isolierten Schienen verlassen hat, stellt der den Blockposten bedienende Wärter den Umschalter U^2 auf 1 (Fig. 33), hiedurch den eigenen Semaphor in die Haltlage versetzend. Sodann stellt derselbe U^2 auf 2 und deblockiert die Station (Fig. 34). Der untere Blockapparat der Station stellt sich auf „Frei", die Verbindung zwischen h, x und h^1, x^1 wird neuerdings hergestellt. Der Strom kehrt nun in Abzweigung über x zu dem Blockwerke des Streckenblockes zurück und stellt selbes auf „Frei". Hiedurch wird nun dem Wärter nicht nur die Möglichkeit benommen, die Station neuerdings zu deblockieren, sondern er erhält auch die Kontrolle darüber, dass die Deblockierung thatsächlich durchgeführt wurde.

Erreicht der Zug die isolierten Schienen i^2, so bereitet er (Fig. 35) die Deblockierung des ersten Streckenblockes vor. Durch

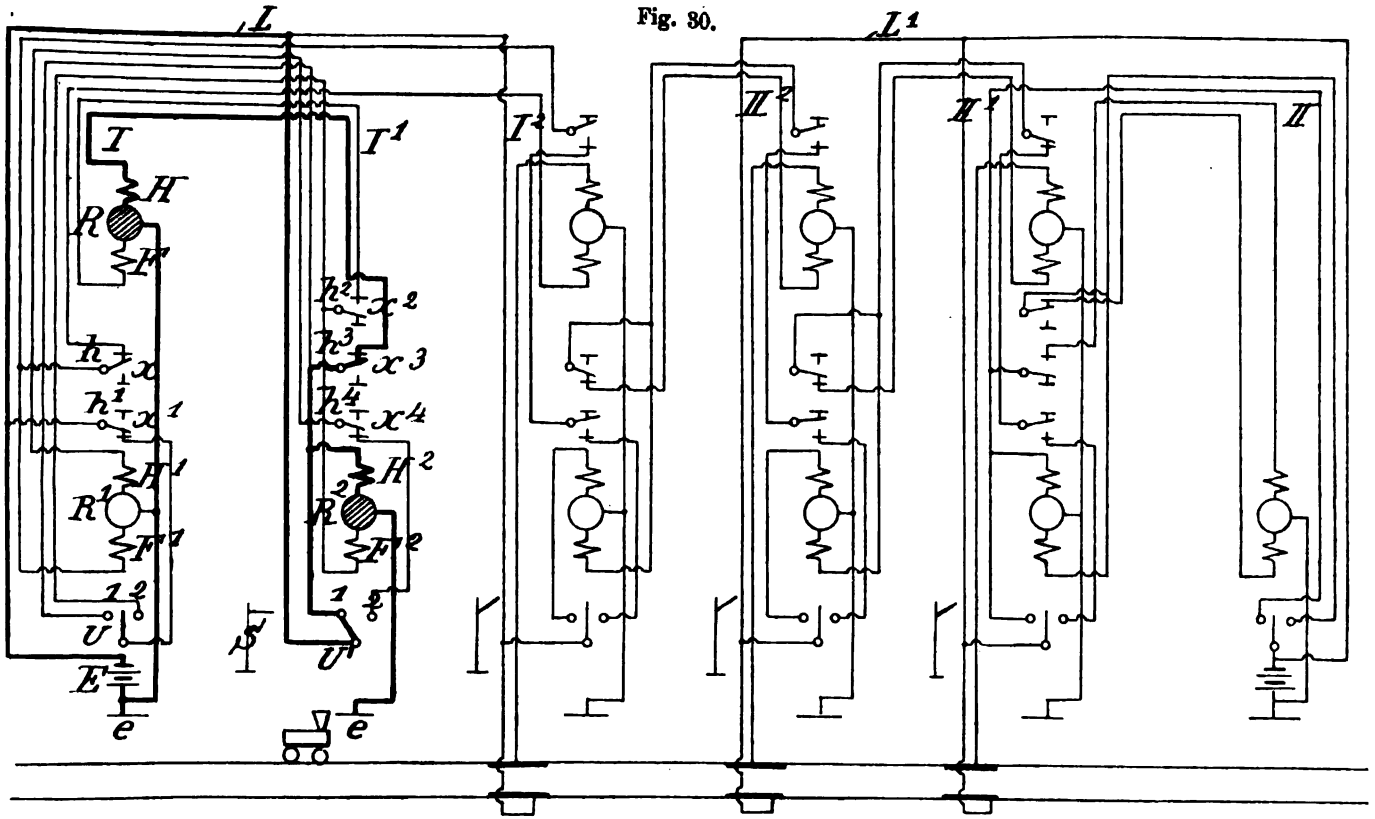
Digitized by Google

Fig. 29.



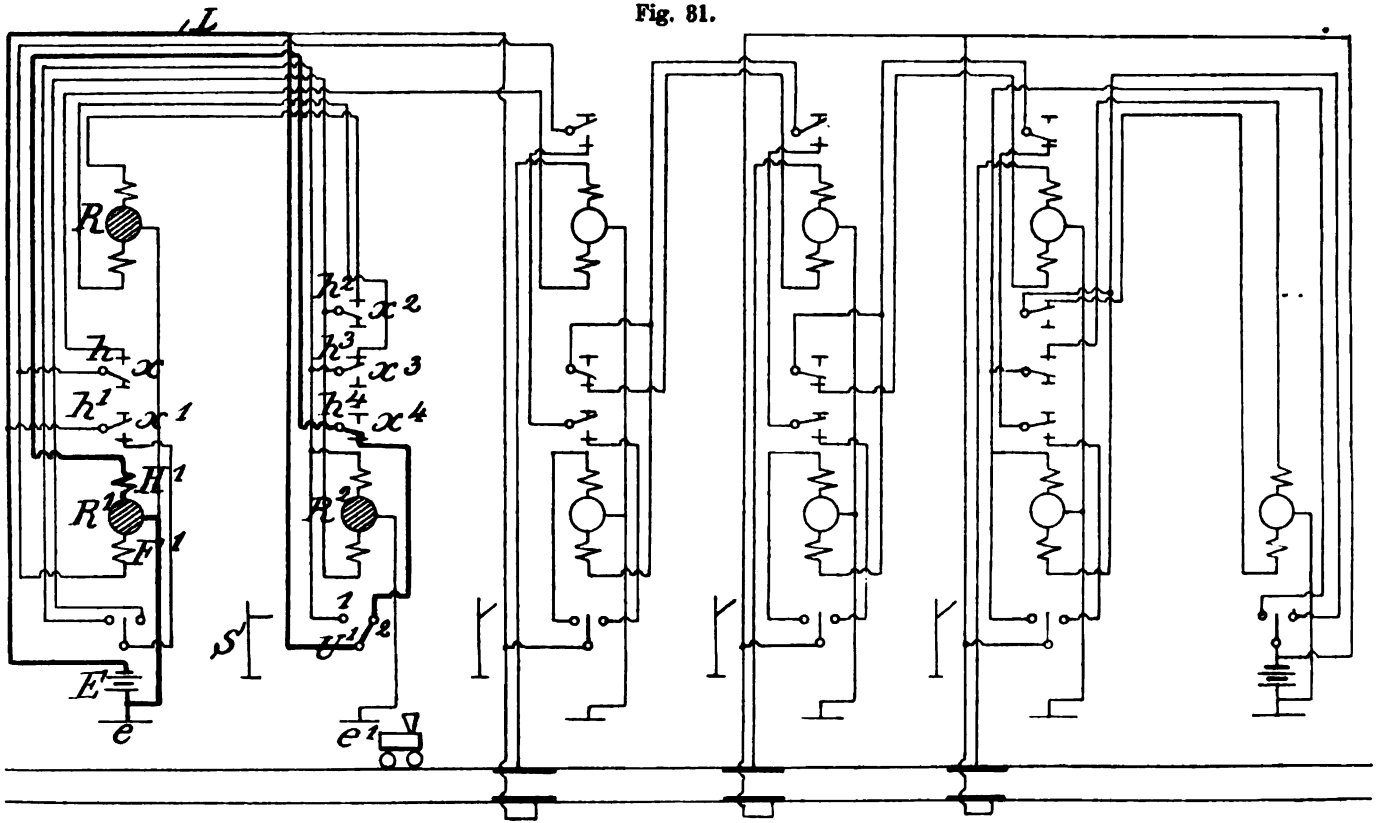
Digitized by Google

Fig. 30.



Digitized by Google

Fig. 81.



Digitized by Google

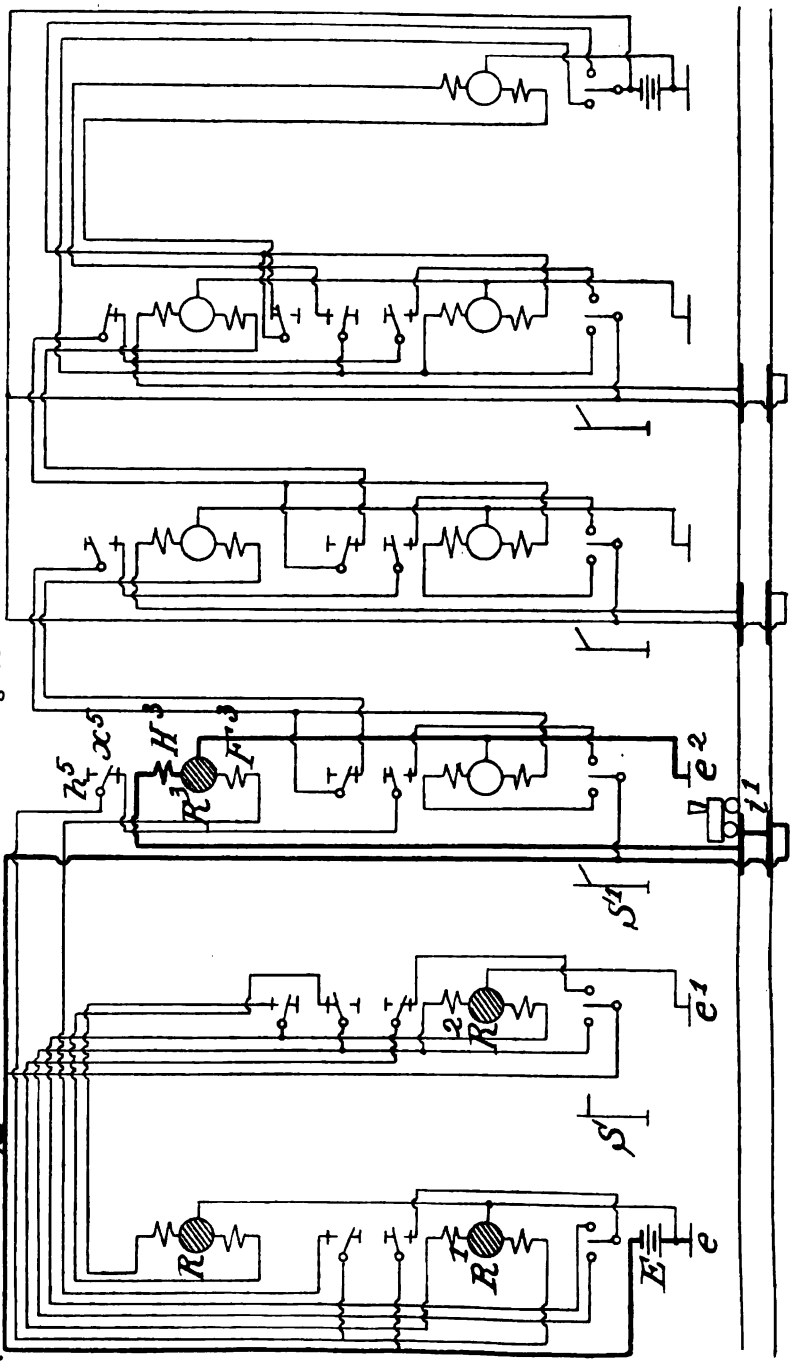
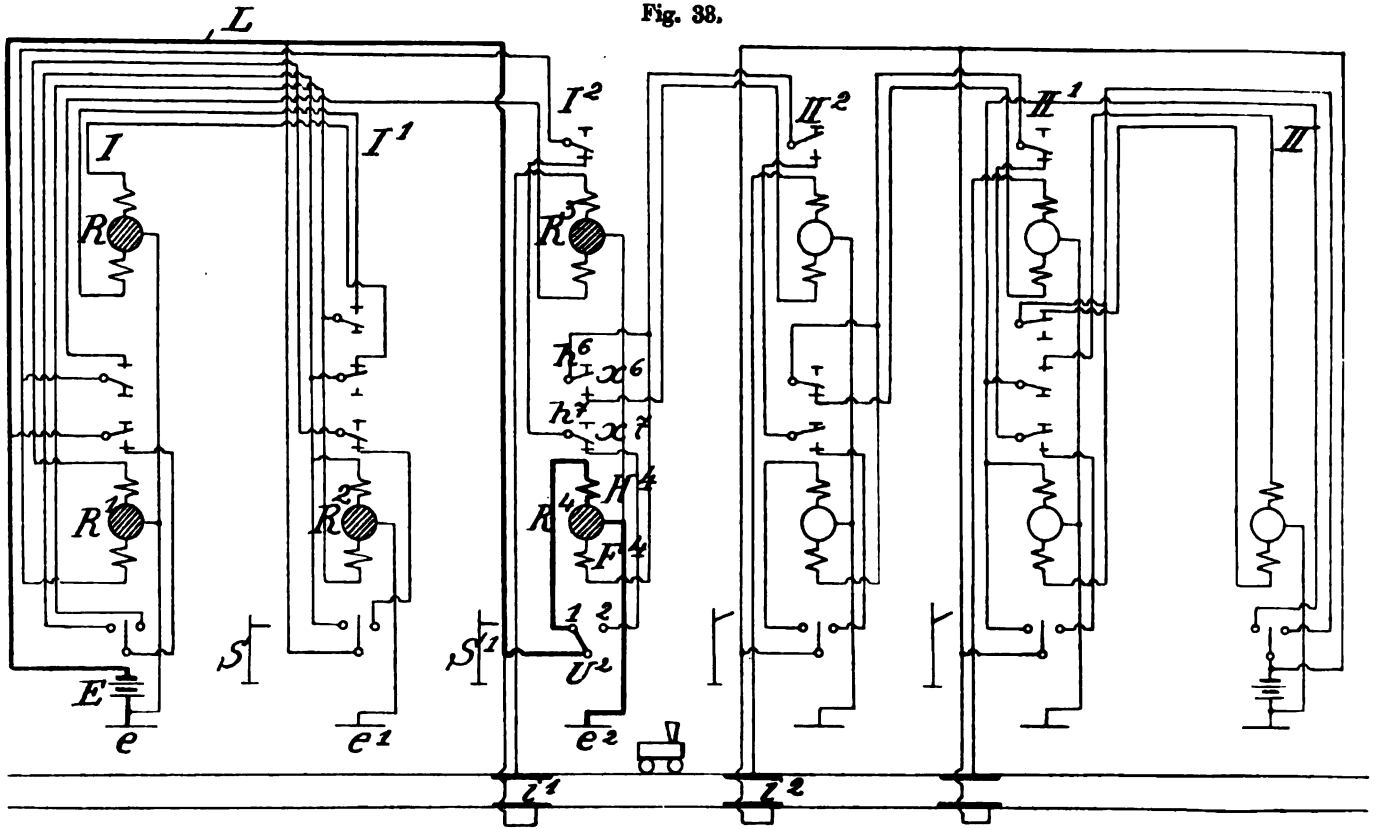


Fig. 92.

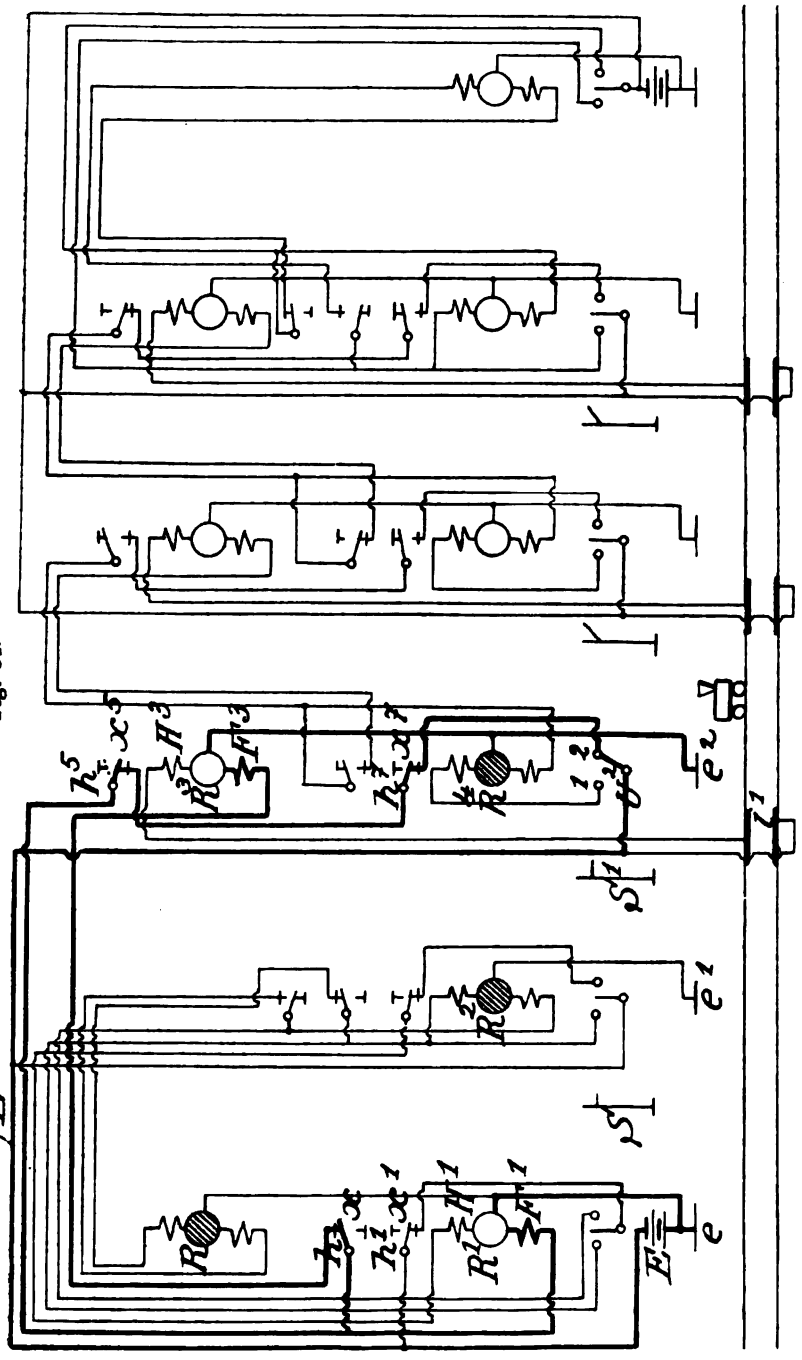
Digitized by Google

Fig. 38.



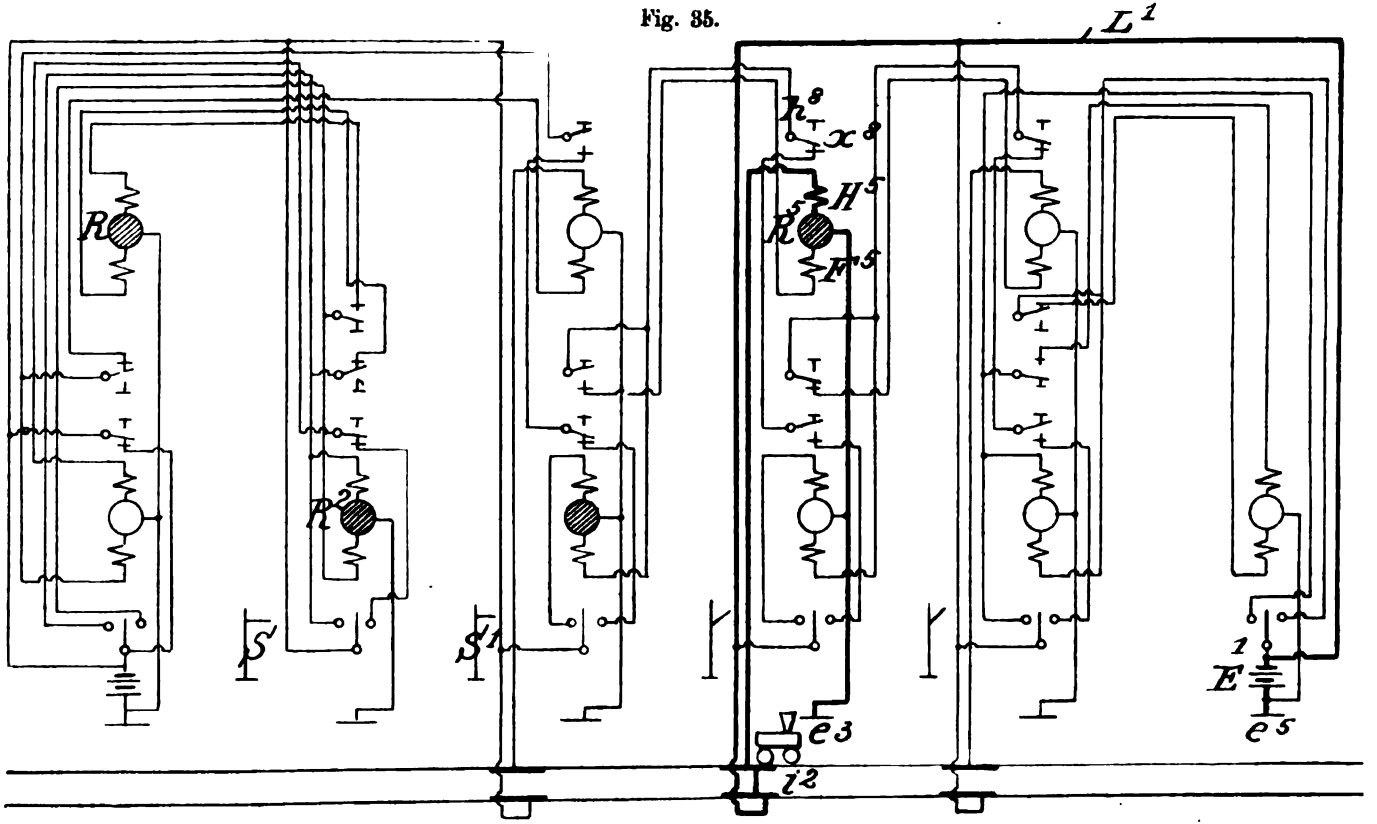
Digitized by Google

Fig. 34.



Digitized by Google

Fig. 35.



Digitized by Google

Umstellen von U^3 auf 1 (Fig. 36) stellt sich Semaphor S^2 auf „Halt", wogegen durch die nachfolgende Umstellung von U^3 auf 2 (Fig. 37) der vorhergehende Streckenblock deblockiert und als Zeichen der erfolgten Deblockierung in ganz ähnlicher Weise wie zwischen Station und erstem Streckenblocke der obere Blockapparat des betreffenden Blockpostens auf „Frei" gestellt wird, hiedurch demselben auch die Möglichkeit einer weiteren Deblockierung so lange entziehend, bis nicht neuerdings ein die Schienen i^2 befahrender Zug diesen Blockapparat wieder auf „Halt" stellt.

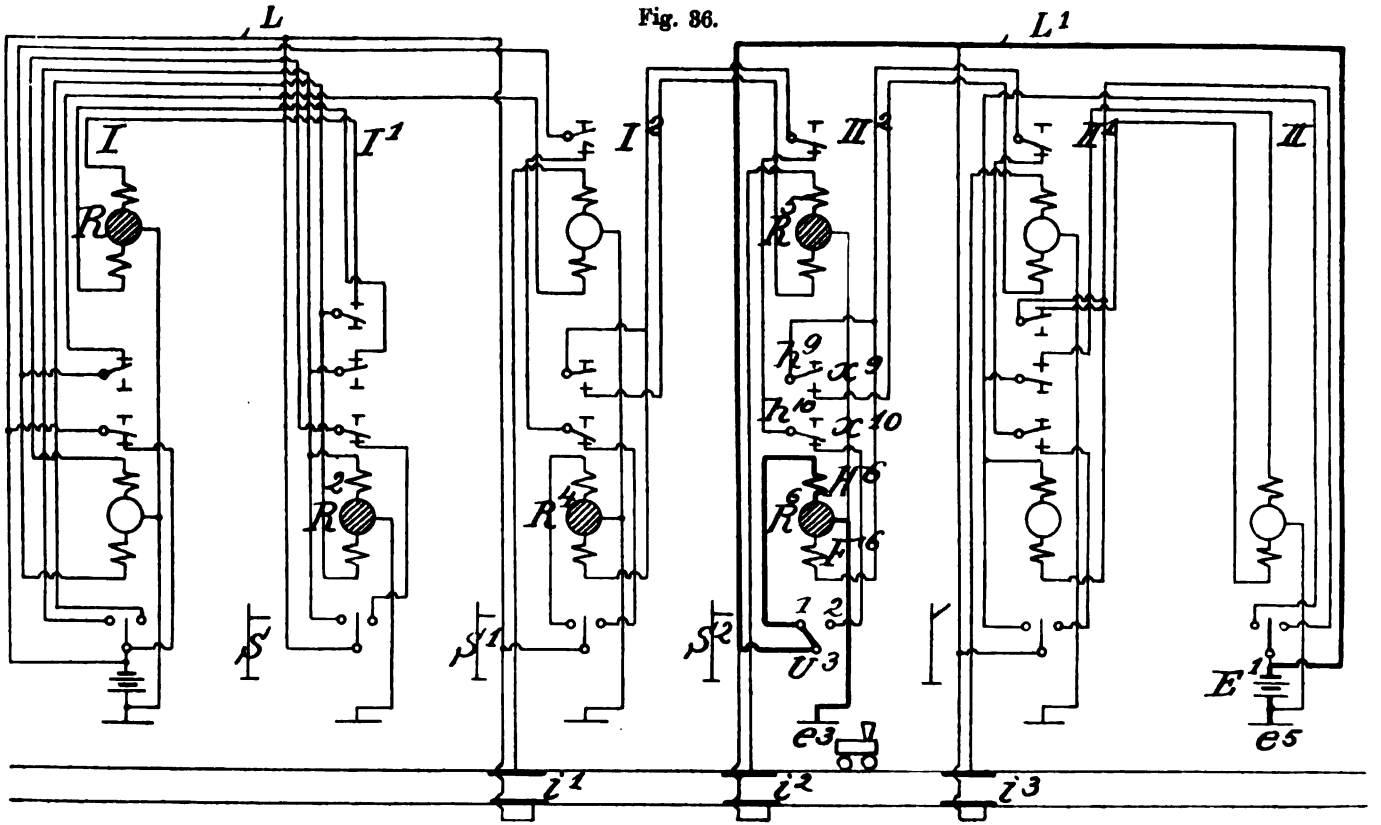
In gleicher Weise lässt sich die Funktion und das Zusammenwirken der einzelnen Teile aus den Fig. 38, 39 und 40 erkennen, wenn der Zug den Einfahrtssemaphor passiert und der Wärter die vorgeschriebenen Umstellungen des Umschalters vollführt. Die Funktion ist ganz dieselbe wie bei irgend einem Streckenblockposten und ergänzt sich nur bei der Haltstellung des eigenen Semaphors dadurch, dass nach erfolgter Durchführung derselben ein Zweigstrom über die nunmehr geschlossene Verbindung h^{13}, x^{13} durch den Blockapparat der Eingangsstation läuft und denselben auf „Halt" stellt und so der Eingangsstation die Kontrolle über die Haltstellung dieses Signales gibt.

Die Art und Weise der „Frei"- bezw. „Haltstellung" des Semaphores des Einfahrtsblockes durch die Eingangsstation zeigen die beiden Fig. 41 und 42. Aus dem Stromverlaufe ergibt sich des weiteren, dass der Stationsblockapparat den Bewegungen des Stellwerkes beim Einfahrtsblocke genau folgt und so eine absolute Kontrolle über die jeweilige Stellung des zugehörigen Einfahrtssignales gibt. Dieser Stationsblockapparat ist, da er den Gang der übrigen Apparate in keiner Weise beeinflusst, sohin als nichts anderes als ein gewöhnlicher Kontrollapparat anzusehen. Durch die Frei- oder Haltstellung des Einfahrtssemaphores von der Station aus kann, wie sich bei aufmerksamem Verfolg des Stromlaufes ergibt, niemals eine Deblockierung des vorhergehenden Streckenblockes stattfinden, so dass auch der Einfahrtsstation jeder Einfluss auf die übrigen Signale der Blockstrecke entzogen ist.

Auch hier zeigt es sich, dass den Grundbedingungen einer geordneten Blocksignalisierung in allen Punkten vollstens entsprochen wird. Allerdings kann der Fall eintreten, dass der Blockwärter das eigene Signal früher auf „Halt" stellt, ehe der Zug den Semaphor gänzlich überfahren hat, allein das bedingt keinen Fehler, weil der Zug durch den Semaphor der nächstrückliegenden Blockstrecke so

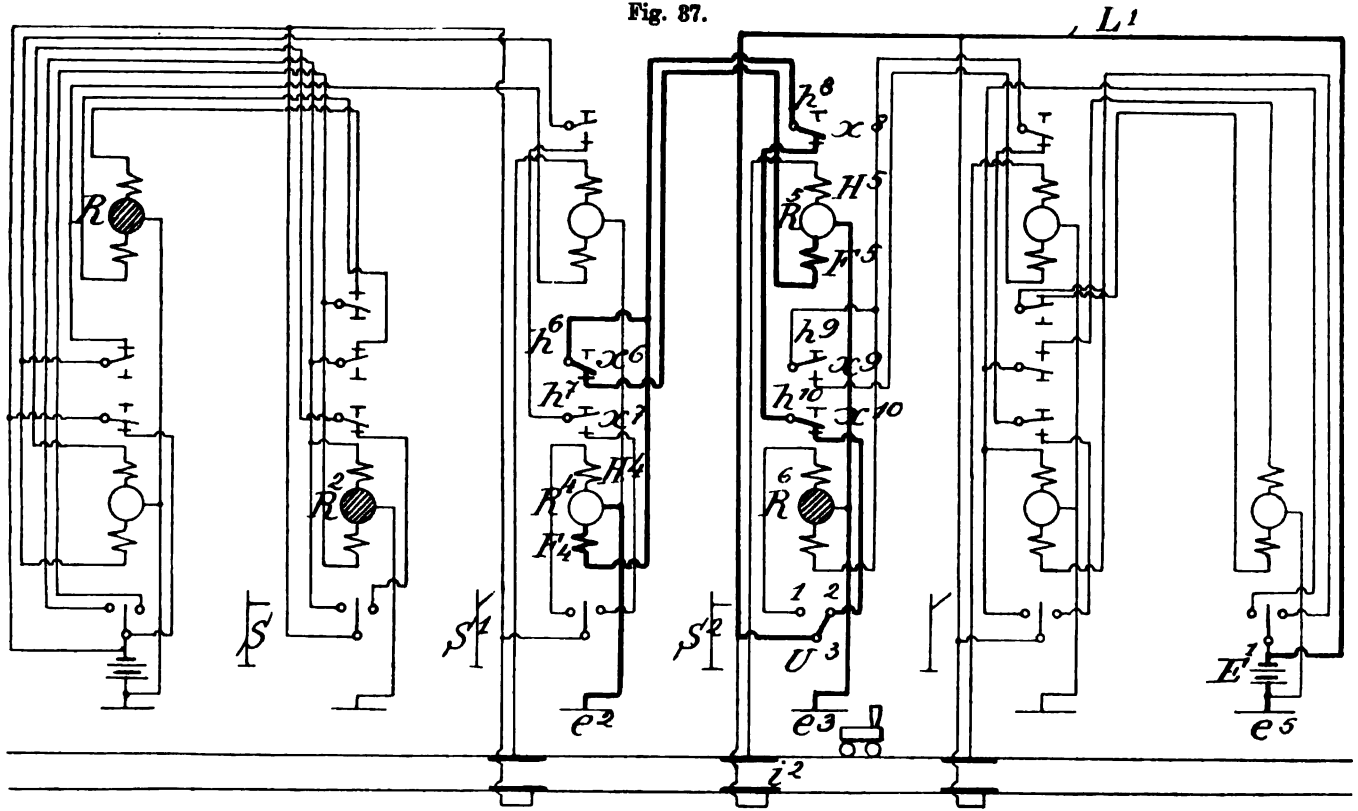
Digitized by Google

Fig. 86.



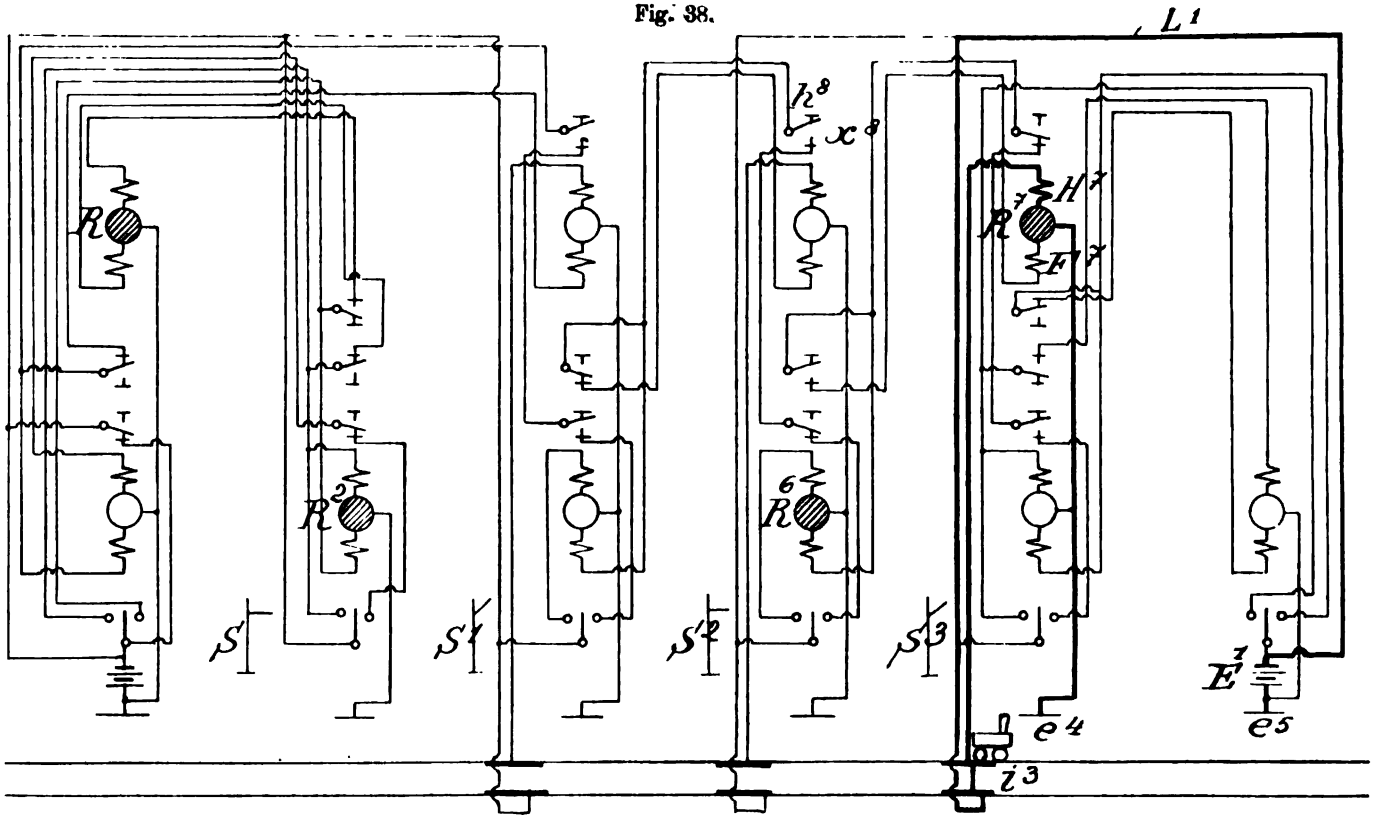
Digitized by Google

Fig. 87.



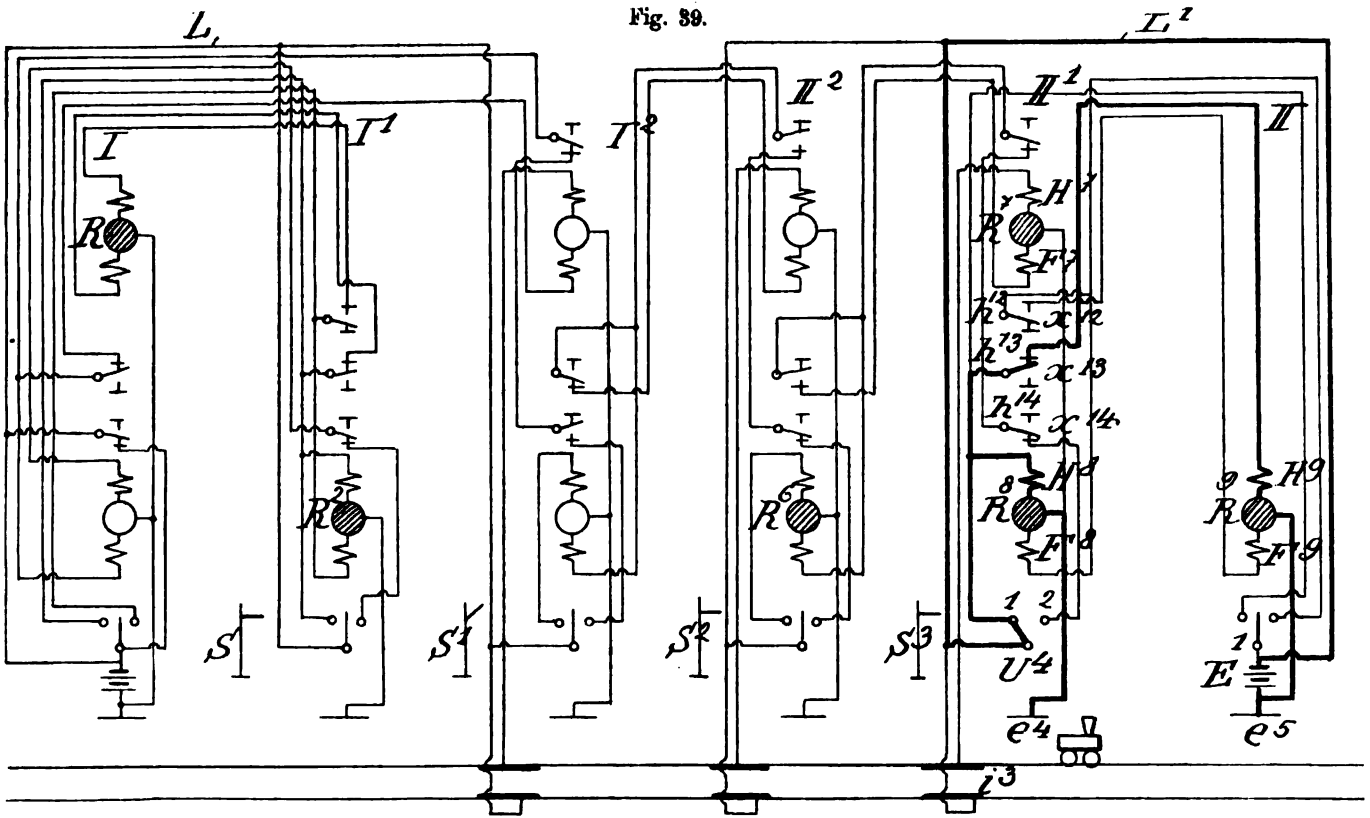
Digitized by Google

Fig. 38.



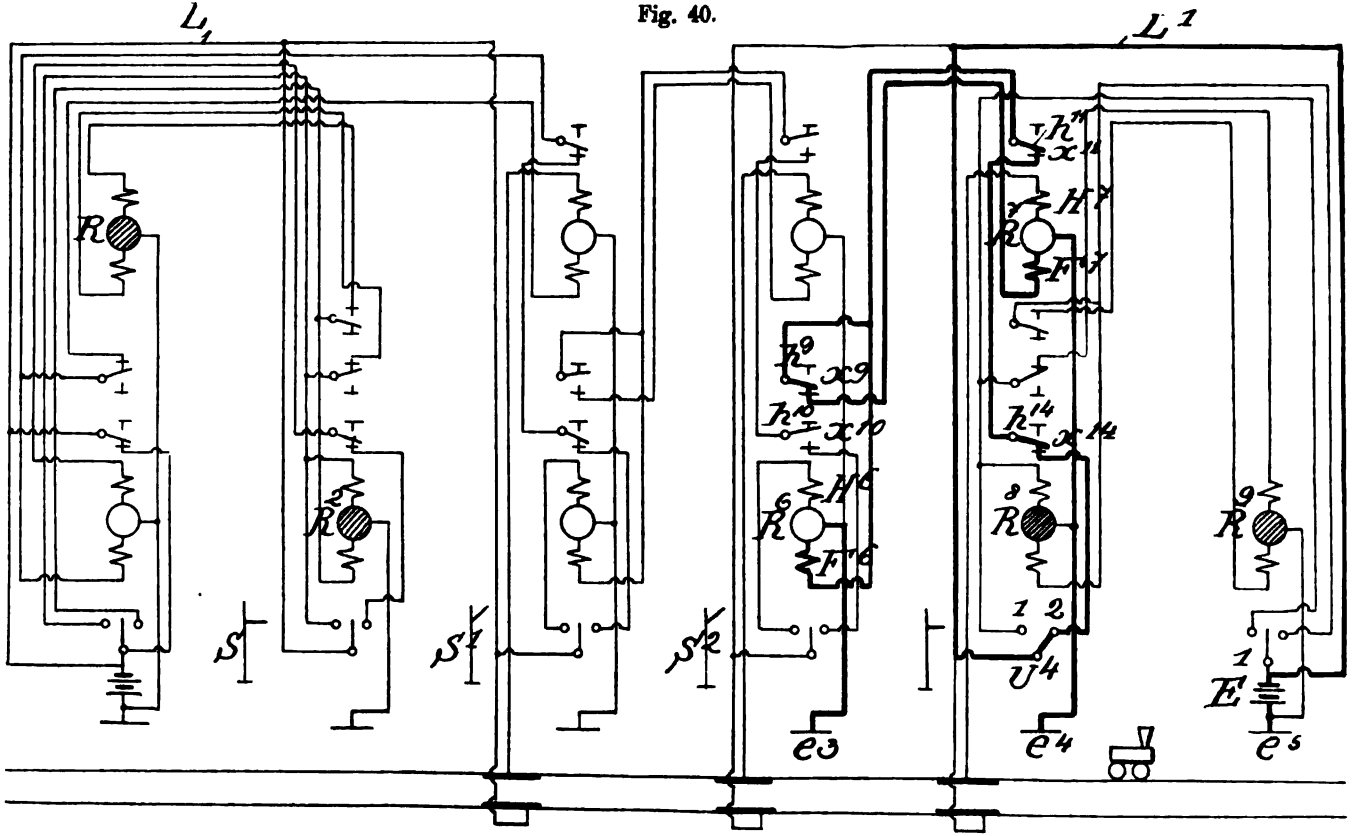
Digitized by Google

Fig. 39.



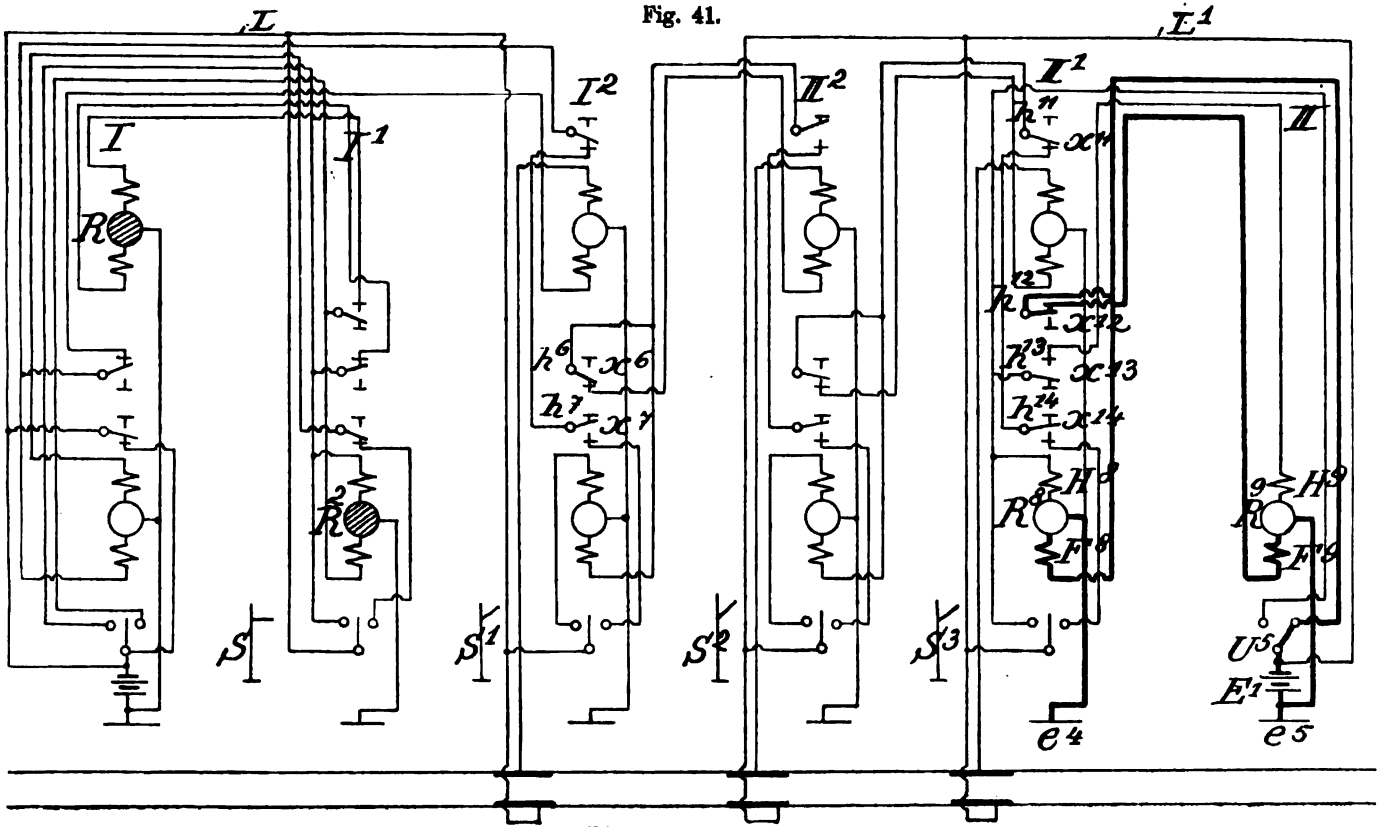
Digitized by Google

Fig. 40.



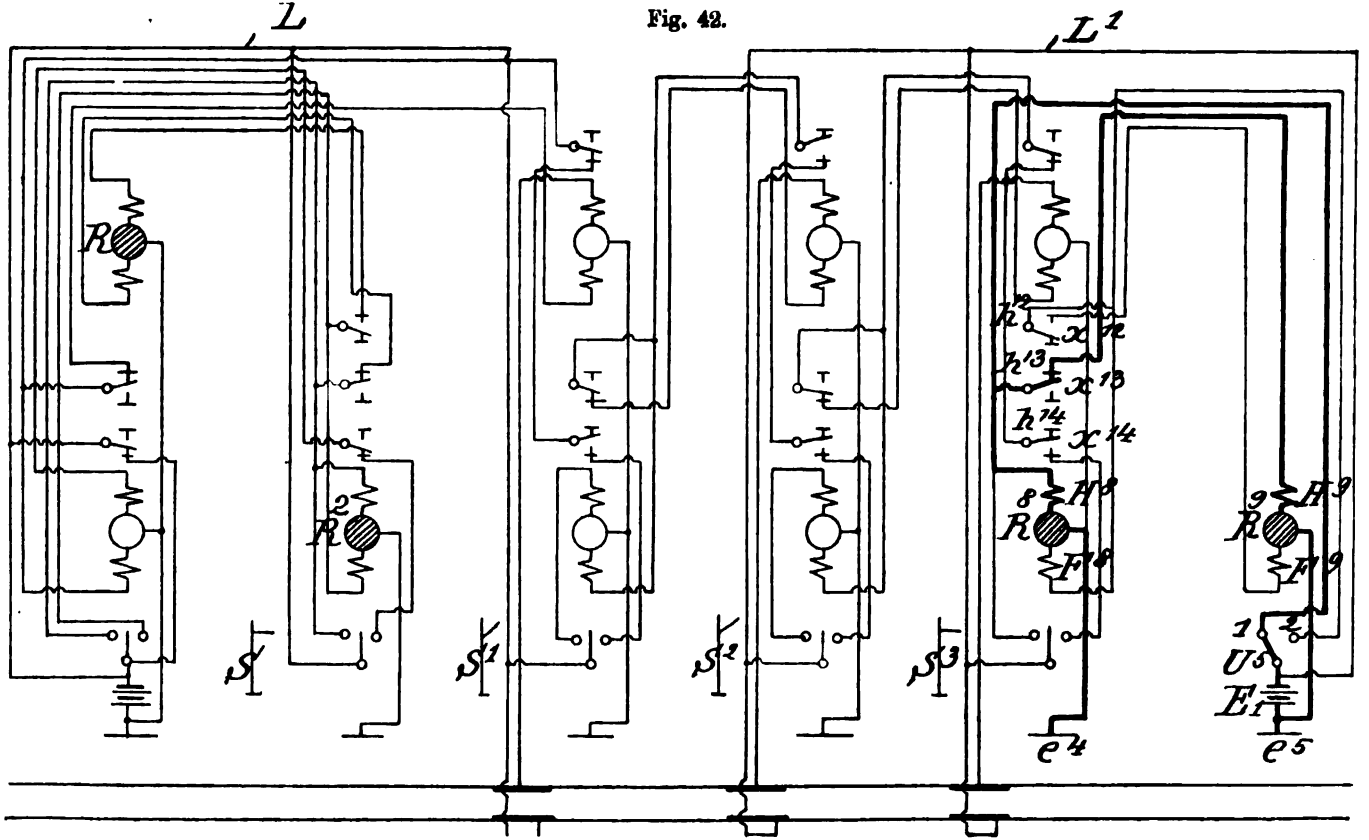
Digitized by Google

Fig. 41.



Digitized by Google

Fig. 42.



Digitized by Google

lange gedeckt bleibt, bis nicht der zu deckende Zug die beiden isolierten Schienen passiert hat, denn erst in diesem Falle ist der bedienende Wärter in der Lage, die Vorstrecke deblockieren zu können. Wird nun dieses isolierte Schienenpaar in der Fahrtrichtung so weit von dem Semaphor verlegt, dass zwischen denselben der längste Zug Platz findet, so ist auch jede Gefahr einer vorzeitigen Deblockierung und somit auch die Gefahr, dass ein Zug ungedeckt bleibt, vollständig ausgeschlossen.

Wiewohl nun durch die beiden beschriebenen und die zahlreichen anderen geschaffenen Anordnungen den Bedingungen einer geordneten Blocksignalisierung in allen Punkten Rechnung getragen scheint, hat man sich jedoch entschlossen, um gewissen, teilweise berechtigten, teilweise aber nicht stichhaltigen Einwendungen zu begegnen, zu einer neuen Anordnung, welche nun als Endtype zu betrachten ist, überzugehen.

Bei dieser Anordnung wird die Haltstellung sämtlicher Semaphore automatisch durch den Zug besorgt und vollziehen sich sämtliche, durch die gegenseitige Abhängigkeit bedingten Funktionen der einzelnen Apparate durchaus selbstthätig, wobei sich auch nach Beendigung dieser Funktionen der Strom selbstthätig abschaltet, so dass die gesamte Linie normal stromlos ist.

Diese Anordnung würde überhaupt keine Bedienung der Blockapparate beanspruchen, wenn eben nicht die bei rein automatisch wirkenden Apparaten vielfach gehegte Befürchtung wäre, dass bei Versagen eines Apparates, und sohin nicht erfolgende Deckung eines Zuges, Gefahren für den Zugsverkehr entstehen könnten und namentlich aber die Regelmässigkeit des Zugsverkehres darunter schwer leiden würde.

Um diesem Einwande zu begegnen, wurde auch die Mitwirkung des Wärterpersonales für die Deckung der Züge in einer Weise vorgesehen, dass die denkbarst geringste Anforderung an dasselbe gestellt wird. Zu diesem Zwecke wurde ein von den eigentlichen Block- und Stellapparaten räumlich getrennter Kontakt, welcher zweckmässig mit einem Signale in Verbindung gebracht wird, so angeordnet, dass er in die von der isolierten Schiene zum eigentlichen Blockapparat führende Stromleitung eingebunden wird, selbe aber normal unterbrochen hält. Erst wenn der bedienende Wärter diesen Kontakt schliesst und so bei Herannahen eines Zuges die Zustimmung zur Stellung des eigenen Signales gibt, ist der Zug in der Lage, den zugehörigen Blockapparat zu stellen, während, sobald sich der Block-

Digitized by Google

apparat gestellt hat, alle übrigen Funktionen, wie Haltstellung des eigenen Semaphores, Deblockierung des Vorblockes, Rückmeldung über die erfolgte Freigabe des Vorblockes, selbstthätig vollziehen. Durch die Anwendung dieses vom Wärter zu bedienenden Kontaktes, welcher im folgenden als „Zustimmungskontakt" bezeichnet werden soll, wird aber noch der weitere Vorteil erreicht, dass die von den Stationen ausgehende und längs der Strecke führende Stromleitung mit den isolierten Schienen oder Schienenkontakten nur indirekt durch diesen Zustimmungskontakt in Verbindung steht und sohin Stromverluste durch Ableitungen, wie solche bei der in Betracht kommenden bedeutenden Spannung von 100 Volt und der immerhin unvollkommenen Isolierung dieser Hilfsapparate in ziemlich umfangreichem Masse entstehen können, hintangehalten werden.

Wie aus den nachfolgenden Erläuterungen des Stromlaufschemas, welches in ganz analoger Weise wie bei den vorher beschriebenen Anordnungen entwickelt wurde, zu entnehmen sein wird, findet der Stromschluss durch den Zustimmungskontakt, selbst wenn derselbe länger als notwendig geschlossen bleiben sollte, immer nur so lange statt, als sich der zu dem Blockposten zugehörige Blockapparat nicht auf „Halt" gestellt hat, was nach erfolgter Stromeinführung in denselben ca. ½ bis 1 Sekunde Zeit in Anspruch nimmt. Unmittelbar in Verbindung mit der Haltstellung wird der Strom durch den im Blockapparate eingebauten und von demselben angetriebenen Umschalter von dem Stromzuführungskontakte abgeschaltet und in andere Richtung gelenkt. Der Zustimmungskontakt, welcher durch den bedienenden Blocksignalwärter von Hand aus bedient wird, ist normal durch eine Zugfeder oder ein Gegengewicht in derjenigen Lage gehalten, bei welcher kein Stromschluss stattfinden kann und wird durch dieselben, nach Loslassen des vorgesehenen Handgriffes durch den Wärter, selbstthätig in die stromlose Lage gebracht, so dass auch hiedurch, selbst bei Versagen des Blockapparates, ein länger währender Stromschluss ausgeschlossen ist.

In den zugehörigen Schaltungsschemas einer derartigen Blockstrecke (Fig. 43 bis 51) sind die Ausgangsstation mit A, der Ausfahrtsblock mit B, der Einfahrtsblock mit E, die Eingangsstation mit N und die beiden Streckenblocks mit S und S^1 bezeichnet.

An Apparaten sind für die Ausgangsstation A zwei Blockapparate vorgesehen, deren oberer nur mit einem einfachen Umschalter ausgerüsteter, jedoch nur zur Kontrolle über die jeweilige Stellung des Ausfahrtssemaphores dient. Der eigentliche Blockapparat ist hier

Digitized by Google

ausnahmsweise sowohl mit einem einfachen als einem Doppelhebelumschalter in Verbindung gebracht.

Für jeden der vier Blockposten ist je ein Blockapparat mit einfachem Hebelumschalter und ein Stellwerk mit Doppelhebelumschalter vorhanden. Das Stellwerk ist mit dem Semaphorarme des zugehörigen Semaphores direkt gekuppelt und bewirkt dessen Umstellung von „Frei" auf „Halt" und umgekehrt.

Zur klareren Erkennung der zu jedem einzelnen Apparate zugehörigen Teile ist zu jedem derselben, ausser der charakterisierenden Bezeichnung, noch der Buchstabe b oder s angefügt, woraus dessen Zugehörigkeit zum Block- oder Stellapparate zu entnehmen ist.

Im allgemeinen sind folgende Bezeichnungen angewendet und zwar:

h b—h b^6 und h s—h s^3 für die Feldmagnetwindungen des Elektromotors, welche die Haltstellung und

f b—f b^6 und f s—f s^3 für jene, welche die Freistellung des Apparates bedingen,

a b—a b^6 und a s—a s^3 die Anker der Elektromotoren,

d b und d s—d s^3 die Doppelhebelumschalter, deren Hebel ausserdem mit I und II bezeichnet sind,

k b—k b^6 die einfachen Hebelumschalter,

u, u^1 die von Hand zu bedienenden Umschalter in den Stationen,

n—n^3 die Nottaster,

z—z^2 die Zustimmungskontakte,

i—i^3 die Schienenkontakte,

e—e^5 die Erdleitungen,

s—s^3 die Semaphore und

b, b^1 die Akkumulatorenbatterien.

Angenommen hierbei wurde, dass sich auf der linken Seite alle Halt-, auf der rechten Seite alle Freiwindungen befinden, ferner dass durch die Umstellung der von Hand zu stellenden Umschalter nach links die Halt- und nach rechts die Freistellung erfolgt. Bei den Umschaltern mit nur einer Leitungsverbindung, wie bei den Nottastern und Zustimmungskontakten, wird die beabsichtigte Wirkung durch Verschieben des Kontakthebels von rechts nach links erzielt.

Die von den Blockapparaten und Stellwerken selbstthätig gesteuerten Umschalter sind für jede Zugsphase in jener Lage gezeichnet, welche selbe nach endgültiger Vollendung der vorgeschriebenen Bewegung einnehmen würden. Es ist daher vor Beginn dieser Bewegung

Digitized by Google

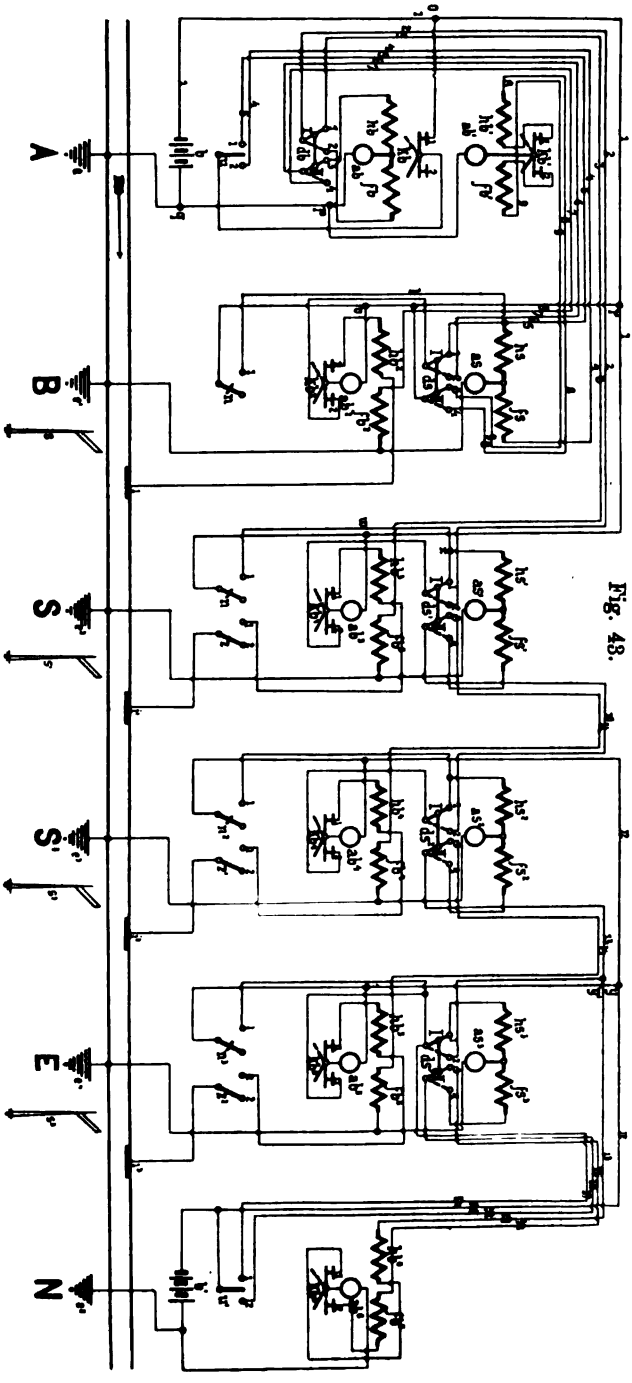


Fig. 43.

stets jene Lage der Umschalter in Betracht zu ziehen, wie solche in der vorgehenden schematischen Darstellung bezw. in der Ruhelage dargestellt ist. Zur leichteren Orientierung bei Verfolg des Stromverlaufes sind die für jede einzelne Zugsphase, stromführenden Leitungen durch stärkere Linien gekennzeichnet.

Da jedoch nicht alle diese markant hervorgehobenen Leitungen gleichzeitig stromführend sind, sondern je nach Stellung der Umschalter erst nach und nach in den Stromkreis einbezogen werden, sei zur weiteren Erleichterung des Verfolges des Stromverlaufes darauf hinge-

Digitized by Google

wiesen, dass der Stromverlauf bis zur gänzlichen Umstellung der für jede einzelne Situation des Zuges in zwei bis vier ganz verschiedene Phasen zerfällt, die, da die gesamten in Betracht kommenden Leitungen durch stärkere Striche hervorgehoben sind, einzeln verfolgt werden müssen.

Die Aufrollung sämtlicher einzelner Stromverläufe für alle die verschiedenen Zugsphasen erweist sich hier wegen der grossen Anzahl der sonst erforderlichen Zeichnungen unthunlich und genügt es, da die einzelnen Vorgänge sich wiederholen, um ein Bild dieser Stromverläufe ihrer Reihenfolge nach zu

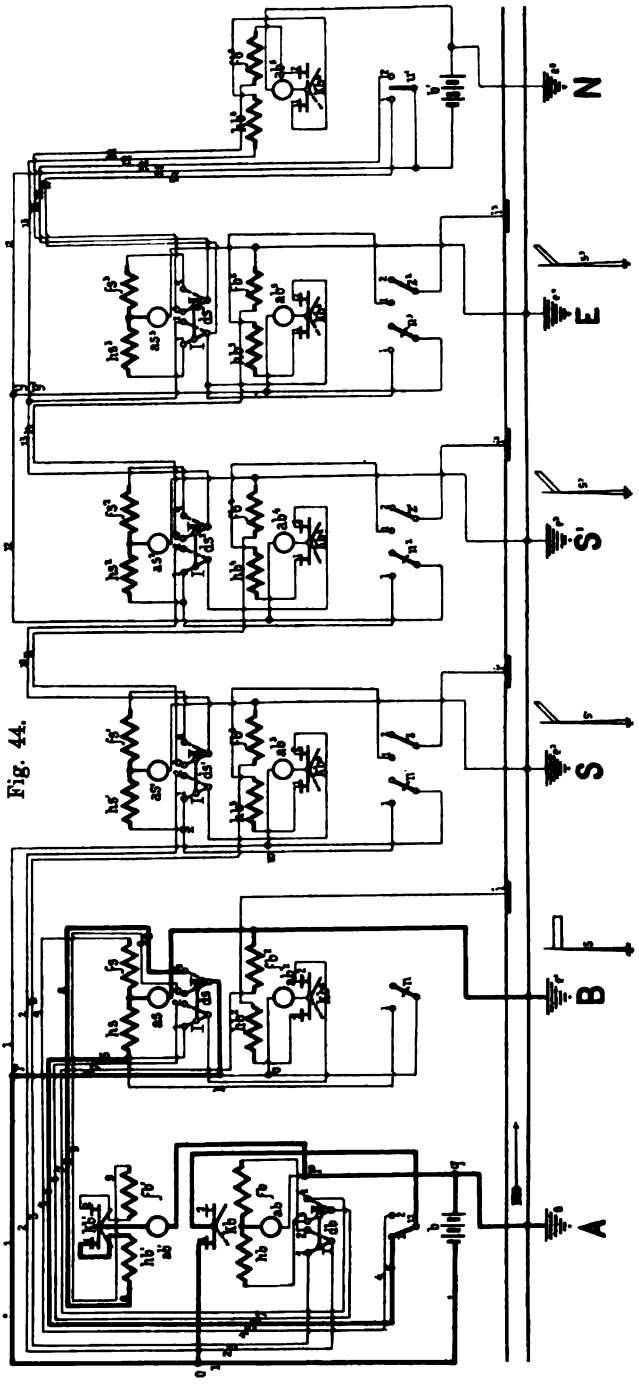


Fig. 44.

Digitized by Google

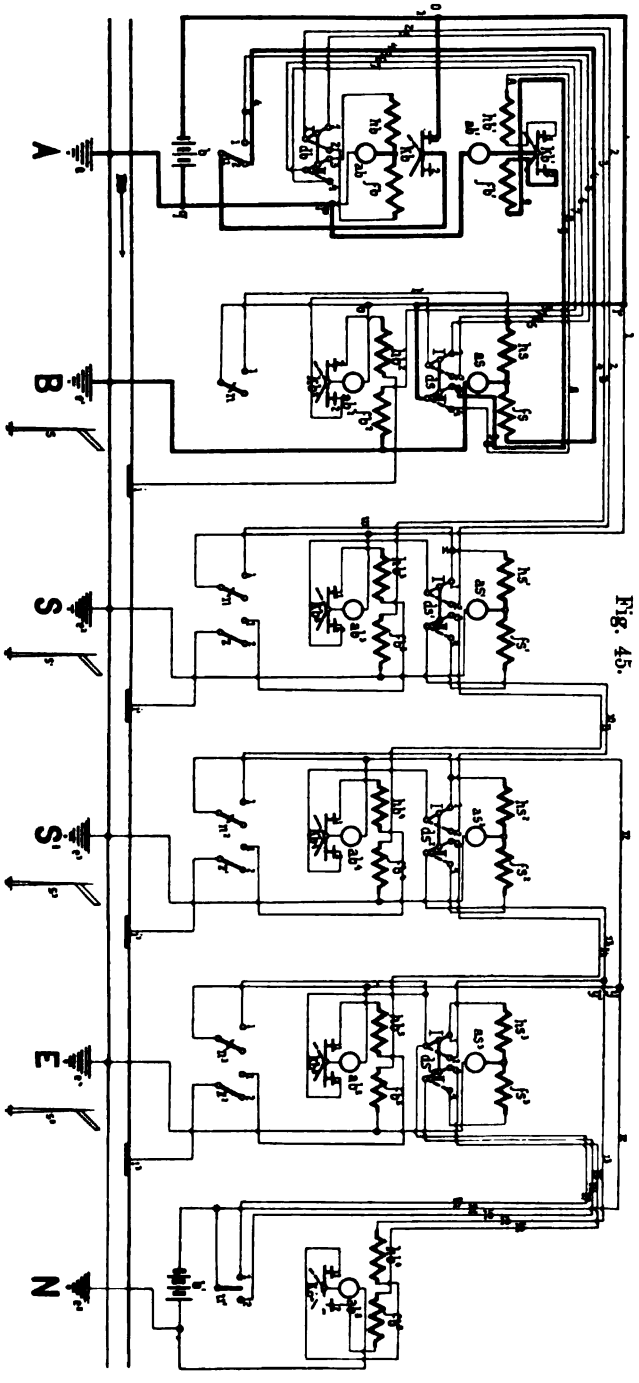


Fig. 45.

gewinnen, zwei Streckenblockposten zu betrachten.

In Fig. 52 (S. 406) ist angenommen, dass sich zwischen den beiden Streckenblockposten S und S^1 ein Zug in der Richtung gegen S^1 bewegt. Der Blockapparat bei S steht auf „Frei", das Stellwerk und der zugehörige Semaphor auf „Halt". Beim Blockposten S^1 nehmen, da der Zug denselben noch nicht passiert hat, alle Apparate die Freilage ein.

Gelangt nun der Zug auf die isolierte Schiene i^2 und legt der den Blockapparat bedienende Wärter den Hebel des Zustimmungskontaktes z^1 auf 1 (Fig. 53 S. 408), so verläuft der

Digitized by Google

Strom, wie durch die verstärkten Linien angedeutet, und stellt den Blockapparat auf „Halt“. Infolge der Haltstellung des Blockapparates legt sich der Umschalter $k\,b^4$ von 1 auf 2 an, wodurch die leitende Verbindung mit dem Zustimmungskontakte unterbrochen, dagegen die Verbindung mit dem Stellwerke hergestellt wird. Der Strom verläuft nun in zweiter Phase, wie in Fig. 54 S. 409 hervorgehoben. Das Stellwerk und der Semaphor werden in die Haltlage gebracht und die beiden Arme I und II des Doppelhebelumschalters $d\,s^2$ legen sich von den Punkten 1 und 3 an die Punkte 2 und 4

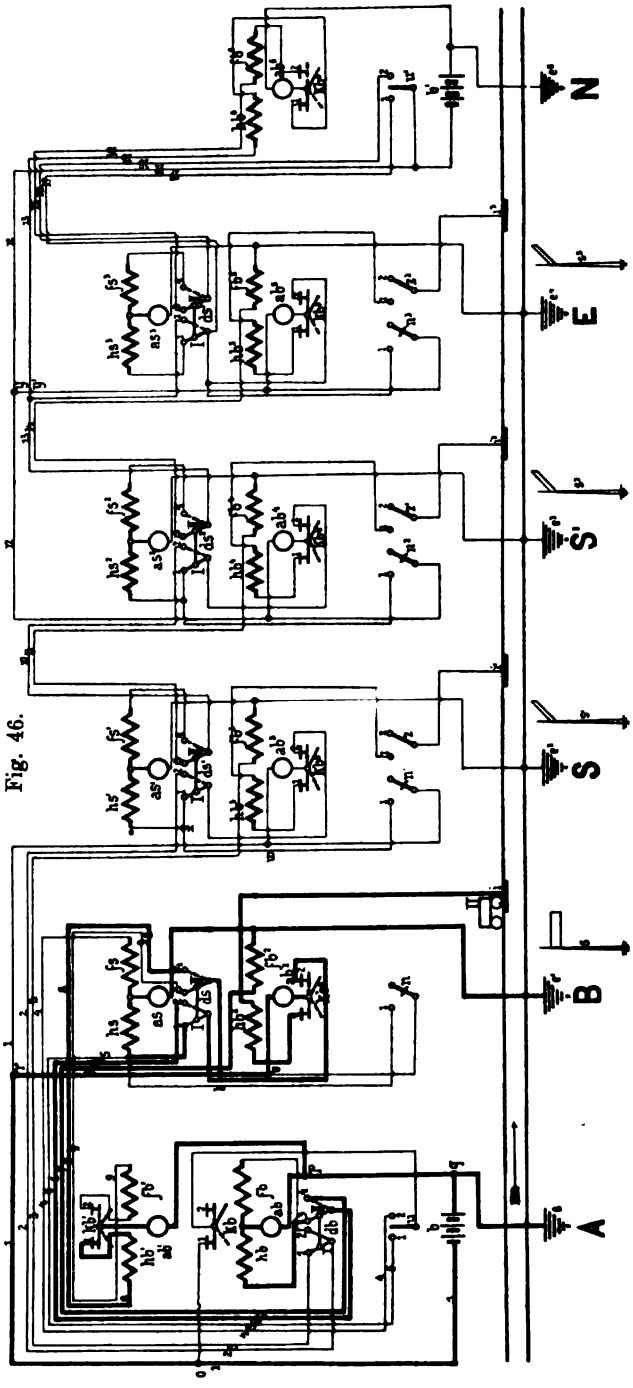


Fig. 46.

Digitized by Google

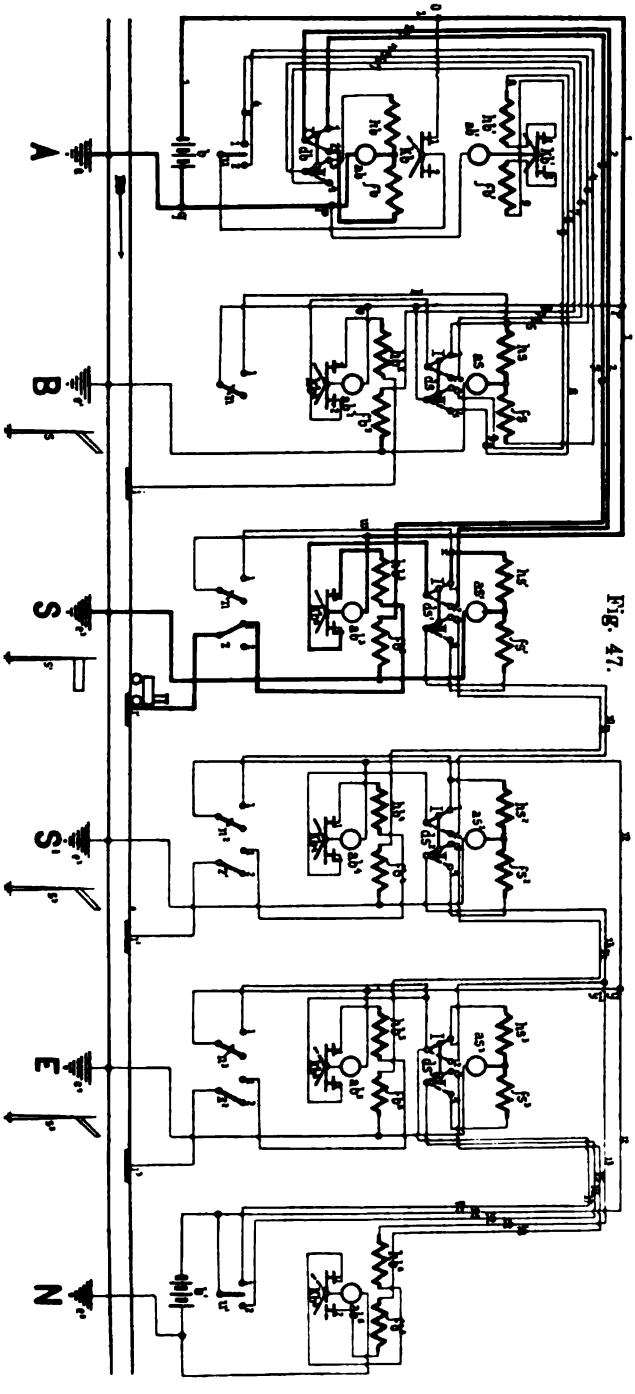


Fig. 47.

an. In der dritten Phase verläuft der Strom, wie sich aus Fig. 55 S. 410 ergibt, zum Blockposten S, stellt das Stellwerk und den Semaphor auf „Frei“ und den Umschalter ds^1 von der in Fig. 55 dargestellten Lage in die Lage, wie solche Fig. 56 zeigt. Durch diese Umstellung von ds^1 wird dem Strome ein Rückweg zu dem Blockposten S^1 gegeben und es stellt sich nunmehr als vierte Phase der Blockapparat von S^1 auf „Frei“. Diese Freistellung dient dem Blockwärter bei S^1 zur Kontrolle, dass sich alle Funktionen in regelmässiger Weise vollzogen haben, bedingt aber noch weiter die vollständige

Digitized by Google

Abschaltung der Apparate von der Stromzuführungsleitung, indem sich der Umschalter $k\,b^4$ vom Punkte 2 abhebt und auf den Punkt 1 anlegt. Da mittlerweile der Zug den Kontakt i^2 bereits verlassen hat und der Zustimmungskontakt wieder in die Ruhelage zurückgekehrt ist, so ist jede weitere Verbindung zwischen 1 bezw. $k\,b^4$ unterbrochen.

Hält man sich diese vier Phasen stets vor Augen, so wird der Verfolg des Stromverlaufes trotz der grösseren Anzahl der hervorgehobenen Stromführungslinien kaum mehr Schwierigkeiten bieten können.

Es wird daher im folgenden darauf ver-

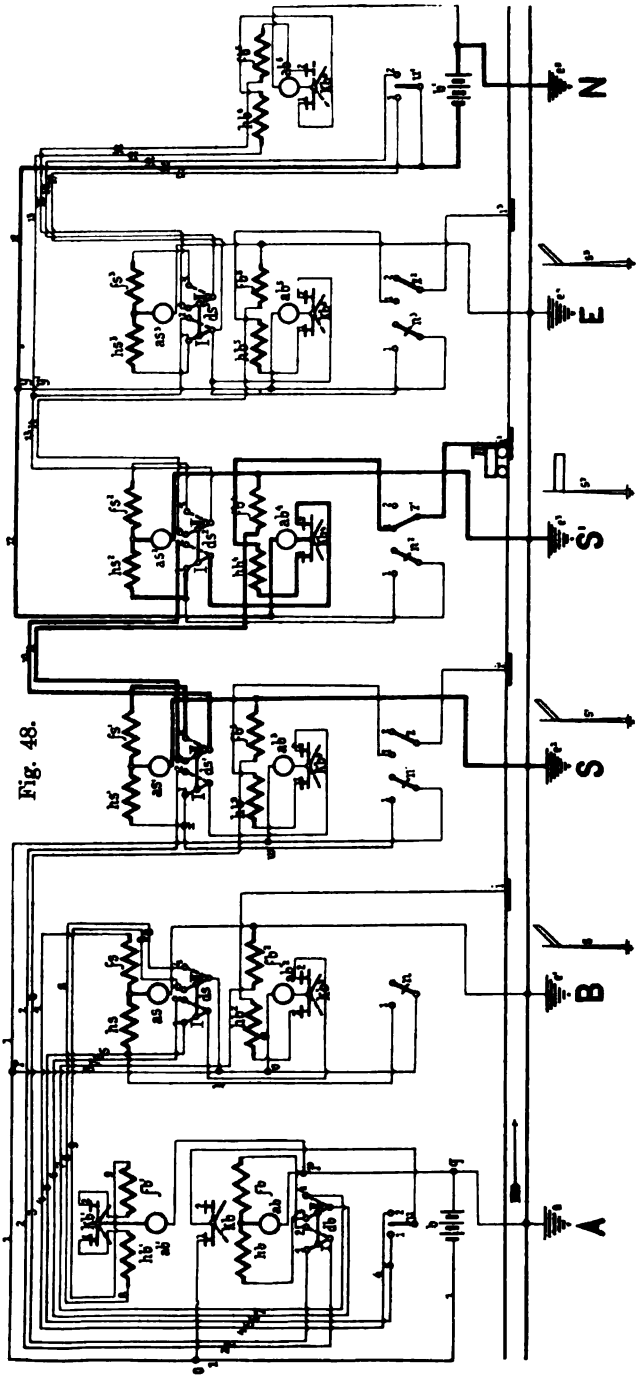


Fig. 48.

Digitized by Google

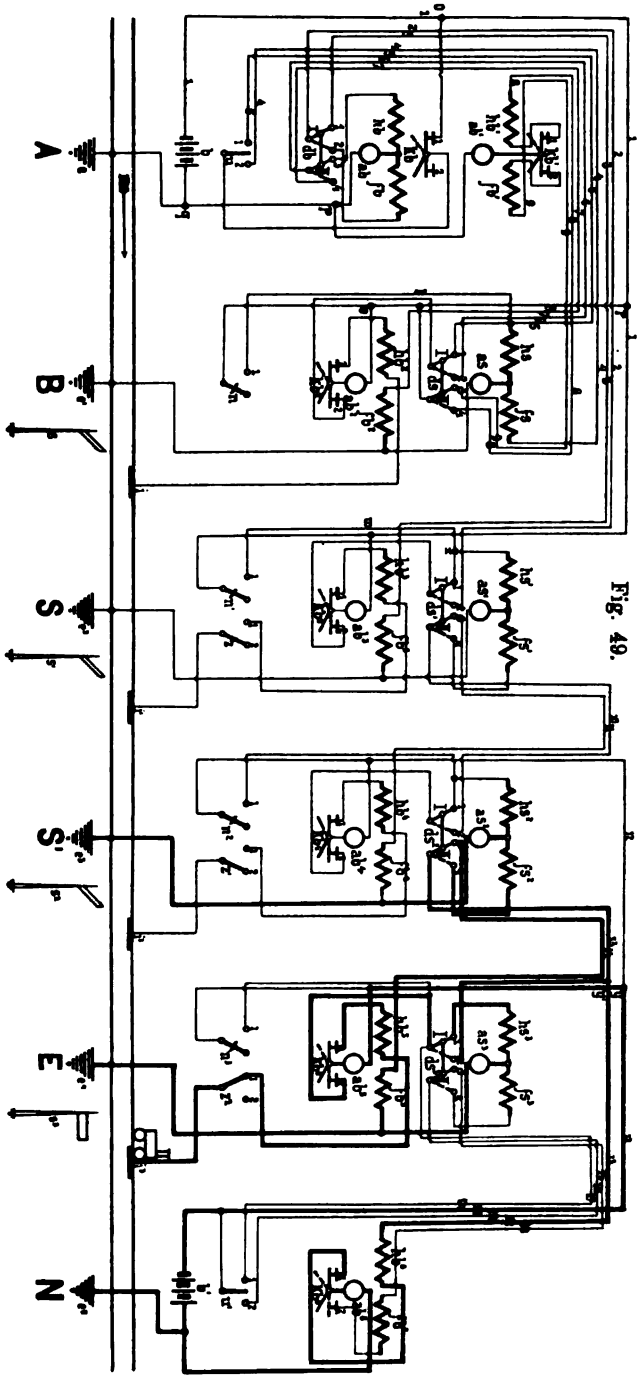


Fig. 49.

zichtet, für die in den Fig. 43 bis 51 dargestellten Stromverläufe eine weitere Erklärung zu geben und sollen daher nur jene Punkte hervorgehoben werden, welche eine Abweichung von dem Vorhergehenden aufweisen.

Will die Station den Ausfahrtssemaphor auf „Halt" stellen, so legt sie den Hebel des Umschalters u auf Kontakt 1. Hier sind nun zwei Phasen zu unterscheiden, und zwar Phase 1: das Stellwerk des Ausfahrtssemaphores (Fig. 44) stellt sich auf „Halt" und der Umschalter ds verschiebt sich von den Punkten 1 und 3 auf die Punkte 2 und 4, und Phase 2: der Strom geht sodann über He-

Digitized by Google

bel II des Umschalters ds zum oberen Blockapparate der Station und stellt selben zur Kontrolle, dass der Ausfahrtsblock richtig funktioniert hat, auf „Halt", wodurch sich auch durch Umlegen des Umschalters kb^1 von 1 auf 2 der Strom unterbricht. In ähnlicher Weise stellt sich der Ausfahrtssemaphor und der obere Blockapparat auf „Frei" (Fig. 45), wenn seitens der Station der Umschalter U auf Punkt 2 gelegt wird.

Fährt ein Zug aus der Station aus und überfährt den Schienenkontakt i, so wird sich, da bei dem Ausfahrtssemaphor von der Anbringung eines Zustim-

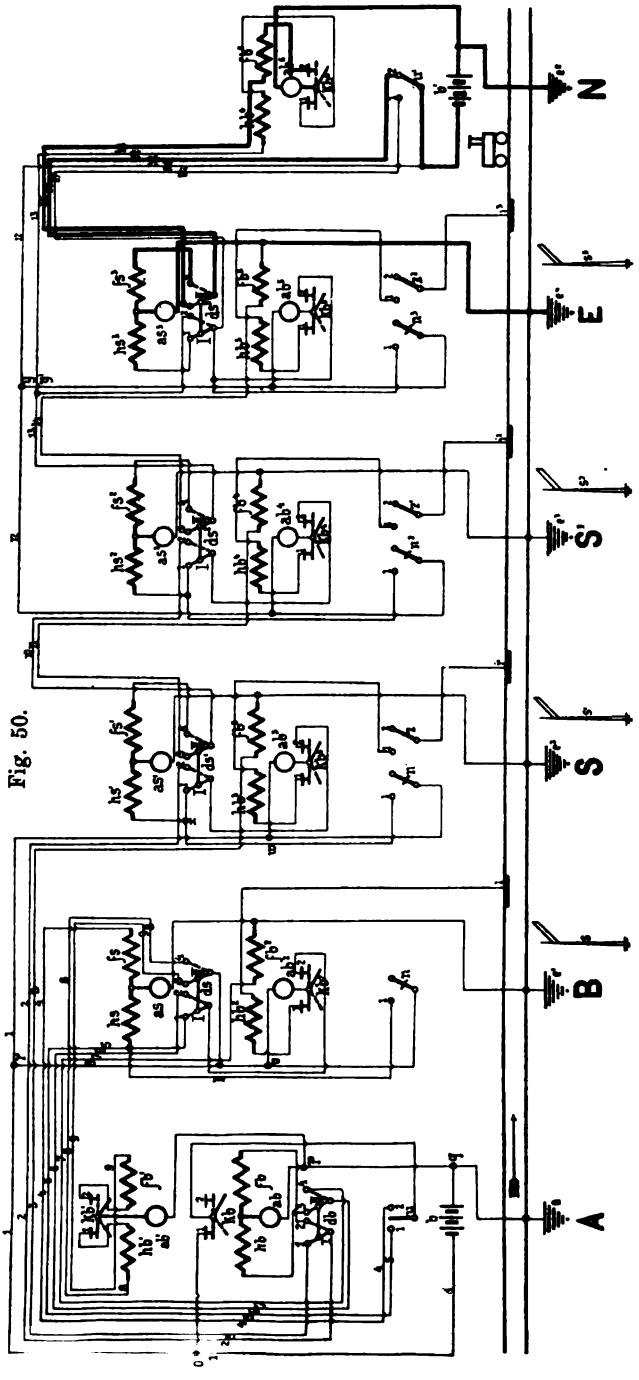


Fig. 50.

Digitized by Google

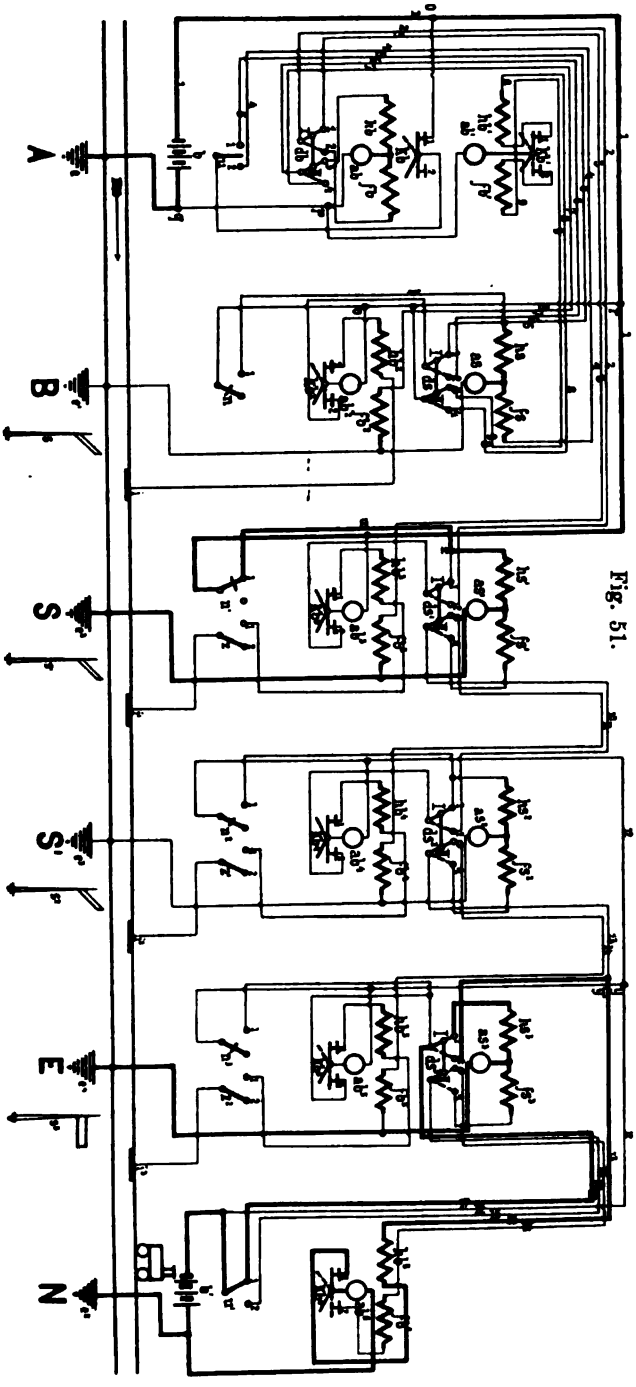


Fig. 51.

mungskontaktes Umgang genommen wurde, der Blockapparat direkt durch den Zug auf „Halt" stellen. Man hat hier folgende vier Phasen (Fig. 46) zu unterscheiden:

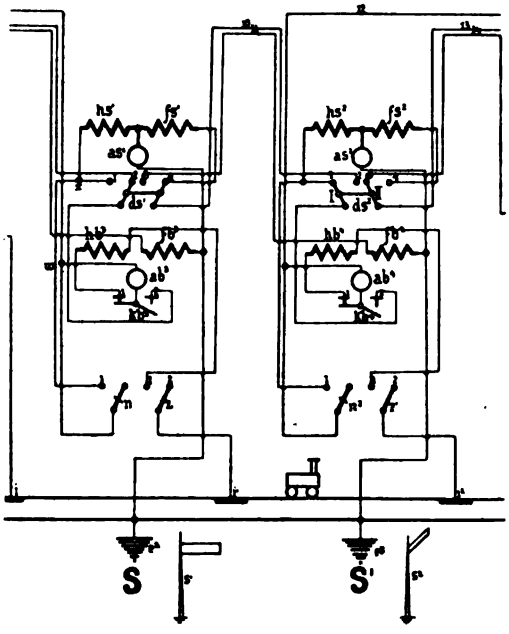
1. der Blockapparat stellt sich auf „Halt";
2. das Stellwerk und der zugehörige Semaphor stellen sich auf „Halt";
3. die beiden Blockapparate der Station stellen sich auf „Halt", indem der Strom sich bei Abzweigepunkt t in zwei Teile teilt und einerseits über d s II, 4 zum oberen Blockapparate der Station und anderenteils über v, a b², k b², 2, d s I, 2 zum unteren Blockapparate und über diesen zur Akkumulatoren-

Digitized by Google

batterie zurückgelangt. Hierbei verschieben sich die Umschalter db, kb und kb^1, wodurch auch die Verbindung von u mit der Batterie aufgehoben wird und die Station sohin den Ausfahrtssemaphor nicht mehr zu stellen vermag; 4. der Blockapparat des Ausfahrtsblockes stellt sich zur Kontrolle der richtigen Funktion aller Teile auf „Frei".

In gleicher Weise sind, wenn der Zug in die Strecken hinter S und E einfährt, diese vier verschiedenen Phasen zu beobachten (Fig. 47 und 49), wobei jedoch für die Einfahrt in die Station N noch ein

Fig. 52.



Zweigstrom über Abzweigepunkt y^1 den Blockapparat dieser Station zur Kontrolle über die Stellung des Einfahrtssemaphores auf „Halt" stellt und für S die Rückwirkung sich nicht auf den Ausfahrtssemaphor, sondern im Sinne der zu Grunde gelegten Bedingungen auf die Ausgangsstation erstreckt, welche hiedurch wieder in die Lage versetzt wird, den Ausfahrtssemaphor nach Bedarf zu stellen.

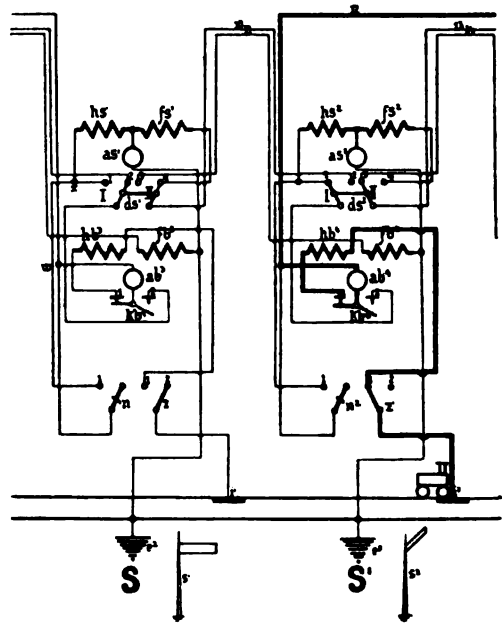
Die Art und Weise der Freigabe und Haltstellung des Einfahrtssemaphores durch die Eingangsstation N ist ohne weiteres aus den Fig. 50 und 51 zu entnehmen, und hieraus auch zu ersehen, dass die Eingangsstation durch den daselbst vorgesehenen, nur der Kontrolle

Digitized by Google

dienenden Blockapparat stets über die jeweilige Lage des Einfahrtssignales genau unterrichtet ist.

Der Zweck der in den Zeichnungen dargestellten Notausschalter n—n^3, welche, wie dies durch kleine Querstriche angedeutet ist, normal gesperrt sind, ist der, den eigenen Semaphor, im Falle sich der Weiterfahrt eines Zuges ein Hindernis entgegenstellt, auf Verbot der Fahrt stellen zu können, ohne dass die übrigen Apparate hiedurch beeinflusst werden. Der auf diese Art einmal auf „Halt" gestellte Semaphor vermag durch den, den betreffenden Blockposten bedienen-

Fig. 53.

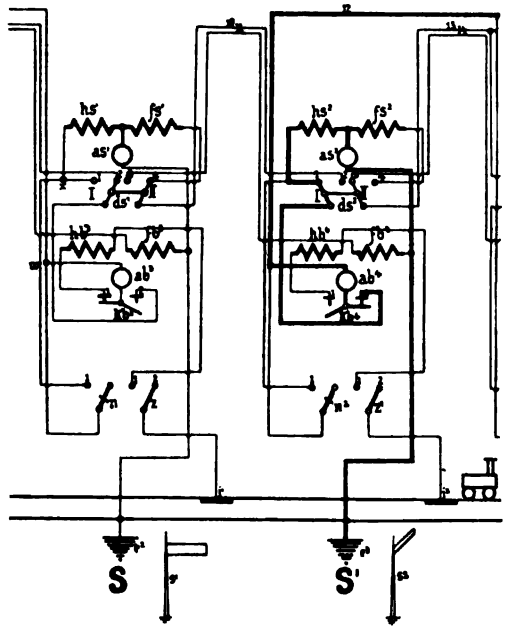


den Wärter nicht mehr auf „Frei" gestellt zu werden, und hat derselbe daher, falls das Hindernis, welches sich der Weiterfahrt des Zuges entgegengestellt hat, beseitigt ist, diesem Zug die Erlaubnis zur Fahrt mittelst Handsignales zu geben. Um jedoch in diesem Falle die Freigabe nach rückwärts zu ermöglichen, muss der Wärter, sobald der Zug den Schienenkontakt überfährt, auch gleichzeitig den Zustimmungskontakt schliessen, wodurch sich der eigene Blockapparat auf „Halt" stellt. Die weiteren Funktionen verziehen sich sodann selbstthätig, nur mit dem Unterschiede, dass die Stellung des Stellwerkes auf „Halt", nachdem selbe bereits erfolgt ist, ausfällt. Langt

Digitized by Google

der Zug nun bei dem nächsten Blockposten an und überfährt den Schienenkontakt, so stellt sich, das Mitwirken des Wärters vorausgesetzt, der zugehörige Blockapparat auf „Halt" und im Sinne der vorhergegangenen Erläuterungen auch der Blockapparat des Vorblockes auf „Frei", wodurch wieder sämtliche Apparate die der augenblicklichen Zugssituation entsprechende Normallage einnehmen. Der Stromverlauf für die Haltstellung des eigenen Stellwerkes vermittelst der Nottaste, welcher sich für alle mit Semaphoren ausgerüsteten Block-

Fig. 54.



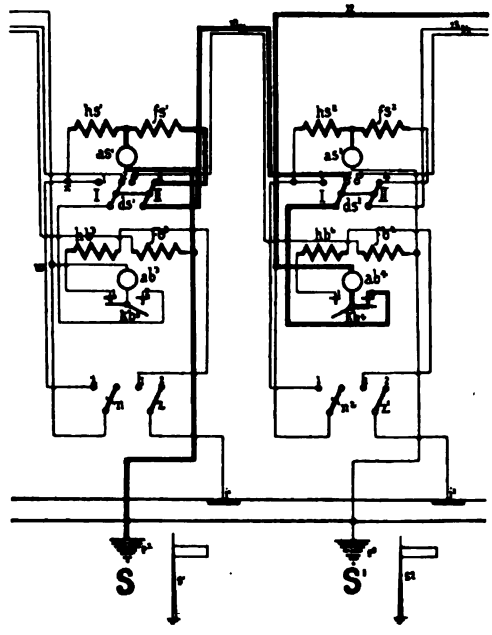
posten stets der gleiche bleibt, ist in Fig. 51 bei S durch verstärkte Linien zur Anschauung gebracht.

Bei genauem Verfolge des Stromverlaufes für alle die verschiedenen Situationen wird sich sofort ergeben, dass auch bei dieser Anordnung allen Anforderungen einer geordneten Blocksignalisierung vollkommen Rechnung getragen wird, wenn die isolierte Schiene oder der Schienenkontakt in der Fahrtrichtung so weit vom zugehörigen Semaphor verschoben ist, dass der längste wahrscheinliche Zug zwischen Semaphor und Schienenkontakt Platz findet, indem dies eine vorzeitige Deckung des Zuges, d. h. bevor derselbe den Semaphor gänzlich überfahren hat, ausschliesst.

Digitized by Google

Da die für diese Blocksignalisierung in Aussicht genommenen Schienenkontakte in ihrer Form und Ausrüstung keine besonders bemerkenswerten Eigentümlichkeiten besitzen und für diese Zwecke jede bewährte derartige Vorrichtung ohne weiteres in Verwendung genommen werden kann, wird von einer detaillierten Beschreibung derselben Umgang genommen und nur erwähnt, dass die in der Verfolgung der verschiedenen Stromlaufschema erwähnten Schienenkontakte nur der Bequemlichkeit halber als isolierte Schienen angenommen wurden, während dieselben mit Rücksicht darauf, dass die Dauer des

Fig. 55.



Kontaktschlusses nur sehr kurz zu währen braucht, wegen der erzielbaren besseren Isolierung mit Vorteil durch sogenannte Schienenkontakte ersetzt werden können.

Bevor diese Arbeit zum Abschlusse gebracht wird, muss jedoch noch der Bedenken, welche sich in Fachkreisen der Anwendung von Starkströmen mit höheren Spannungen entgegenstellen, Erwähnung gethan und deren Widerlegung versucht werden.

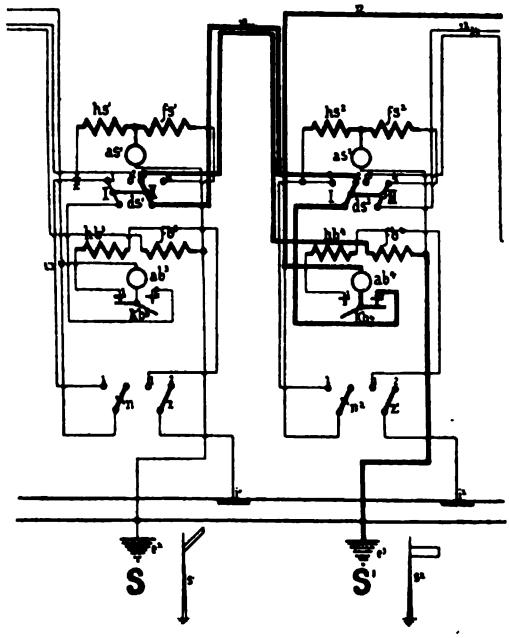
Eines der Hauptargumente, welches gegen die Verwertung von Akkumulatoren für diese Zwecke vorgebracht wird, ist, dass die Isolierung der Schienenkontakte nie so durchzuführen sein wird, dass

Digitized by Google

nicht Nebenschlüsse entstehen und sich die Akkumulatoren infolgedessen vorzeitig entladen müssen, wodurch nicht nur die Funktionssicherheit in Frage gestellt erscheint, sondern auch die Betriebskosten eine unerschwingliche Höhe erreichen werden.

Trifft dies bei jenen Anordnungen, bei welchen die Schienenkontakte mit den stromführenden Leitungen ununterbrochen verbunden sind, wohl teilweise zu, da sich Nebenschlüsse bei in das Bahnbett eingelegten Schienenkontakten nie vollkommen vermeiden lassen werden, so ist dies bei der letztbeschriebenen Anordnung, bei welcher die

Fig. 56.



Verbindung der stromführenden Leitung durch die Apparate mit den Schienenkontakten nur für die kurze Zeit des wirklichen Bedarfes hergestellt erscheint, absolut ausgeschlossen.

Aber auch für den Fall, dass die stromführende Leitung fortwährend mit den Schienenkontakten verbunden sein sollte, dürfte die Gefahr allzugrosser Stromverluste bei weitem überschätzt werden, indem die dem Stromdurchgange sich entgegensetzenden Uebergangswiderstände bei nur einigermassen sorgfältig durchgeführten Isolierung so hohe werden müssen, dass die Stromverluste dem Ohmschen Gesetze entsprechend nur ganz geringfügige sein können. Es ist aber

Digitized by Google

auch hier durchaus nicht ausgeschlossen, die eigentlichen Kontaktstücke so zu isolieren, wie etwa die Leitungen, indem man dieselben über dem Bahnniveau entweder seitlich oder über der Schienenmitte anbringt und die Kontaktverbindung durch Bürsten oder Bügel, welche an der Lokomotive entsprechend befestigt sind, herstellen lässt. Derartig angebrachte Kontaktstücke lassen sich ebensogut isolieren wie die stromführenden Leitungen.

Verluste durch die Leitungen sind bei der heutigen Entwickelung des Leitungsbaues, sofern man es überhaupt nicht vorzieht, Kabelleitungen zu verwenden, nur insoweit zu befürchten, als der durch den Widerstand derselben gegebene Energieverbrauch zu berücksichtigen ist. Diesen Verlust auf ein Minimum herabzudrücken, wurde eben die hohe Betriebsspannung gewählt.

Ein weiteres vielfach vorgebrachtes Bedenken bezieht sich auf die Kosten des Betriebes, indem der zur Bethätigung der Apparate erforderliche Stromverbrauch als hoch angenommen wird. Eine kleine Berechnung lehrt jedoch, dass diesbezüglich die Anforderungen bei weitem nicht so hoch sein können, als befürchtet wird.

Gehen wir von der Arbeit aus, welche die Elektromotoren für jeden einzelnen Fall zu leisten haben werden, so finden wir vorerst, dass die grösste Leistungsfähigkeit von dem Elektromotor des Stellwerkes und zwar für die Stellung des Semaphorarmes von „Halt“ auf „Frei“ verlangt wird. Da die Semaphorarme durch ein Gegengewicht so ausbalanziert sind, dass die längere Seite des Armes nur ein geringes Uebergewicht besitzt, so kommt nur für die zur Drehung desselben erforderliche Kraft, die Achsreibung und das Uebergewicht, welches mit 2 kg angenommen werden kann, in Betracht. Sei die Achsreibung vorläufig vernachlässigt und späterhin gleich mit in die, in dem Triebwerke auftretenden Reibungswiderstände eingerechnet, so wird bei einer Drehung des ungefähr 1,75 m langen Armes um 45° nach aufwärts eine Weglänge von annähernd 1,4 m zurückgelegt und ist zu deren Ueberwindung, wenn, was zwar unrichtig ist, im Interesse der Sicherheit aber angenommen werde, vorausgesetzt wird, dass diese 2 kg 1,4 m hoch gehoben werden sollen, eine Arbeitsleistung von 2,8 mkg erforderlich. Da für eine derartige Umstellung annähernd 2 Sekunden benötigt werden, hätte der Elektromotor ohne Berücksichtigung der weiteren Verluste nur 1,4 Sekundenmkg zu leisten. Sei der Wirkungsgrad des Elektromotors nur mit 50 % und der gesamte Reibungsverlust hoch mit 30 % der Leistungsfähigkeit des Elektromotors angenommen, so lässt sich der für eine Umstellung erforder-

Digitized by Google

liche Verbrauch an elektrischer Energie mit 40 Sekundenwatt und die Leistungsfähigkeit des Elektromotors mit 0,053 PS berechnen. Dieselbe sei jedoch der weiteren Sicherheit wegen mit 0,06 PS und der Energieverbrauch mit 50 Sekundenwatt angenommen.

Die von dem Motor des eigentlichen Blocksignales zu leistende Arbeit beträgt, da hier doch nur in einfacher Uebersetzung eine Scheibe um 180° zu drehen und ein Kontakt umzustellen ist, die gesamte Bewegung sich in kaum ½ Sekunde vollzieht, nur einen geringen Bruchteil der vom Stellwerksmotor zu bewältigenden Arbeit, sei aber wieder zur Sicherheit mit der Hälfte derselben, und die zum Rückstellen des Semaphores von „Frei" auf „Halt" erforderliche Arbeit gleich der Arbeit für das Stellen des Semaphores auf „Frei" angenommen.

Für jede Vorbeifahrt des Zuges bei einem Blocksignale kommen nun, wie aus der Beschreibung des Stromverlaufes der letzten endgültigen Anordnung hervorgeht, folgende vier Funktionen der Apparate in Betracht und zwar 1. Stellen des eigenen Blockapparates auf „Halt"; 2. Stellen des eigenen Stellwerkes auf „Halt"; 3. Stellen des Stellwerkes des Vorblockes auf „Frei" und 4. Stellen des eigenen Blockapparates auf „Frei".

Zur Durchführung dieser verschiedenen Bewegungsphasen, welche sich innerhalb weniger Sekunden vollzogen haben, sind demnach insgesamt $5 \times 50 = 250$ Sekundenwatt erforderlich.

Der Verlust in den Leitungen betrage durchschnittlich 10%, was bei entsprechender Dimensionierung derselben leicht einzuhalten sein wird, der Nutzeffekt der Akkumulatoren 60%, so werden dieselben sonach für jede einmalige Umstellung eines Signales 467 Sekundenwatt eingeliefert erhalten müssen und beträgt sohin der effektive Kraftbedarf für eine Umstellung 0,00018 Kilowattstunde.

Der Erzeugungspreis der Kilowattstunde inklusive Verzinsung und Amortisation und inklusive Bedienung und Transport der Ladevorrichtung sei in Berücksichtigung der abnormalen Verhältnisse hoch mit 1 Mark angenommen. Es belaufen sich sohin die Betriebskosten für eine komplette Signalumstellung (vier verschiedene Funktionen) auf 0,018 Pfg., oder mit anderen Worten, mit einer Auslage von 1 Mark lassen sich 8480 vollständige Signalumstellungen bewerkstelligen.

Aber selbst wenn sich vorstehende Berechnung, wiewohl mit grossen Sicherheitskoeffizienten gerechnet wurde, praktisch nicht als stichhaltig erweisen sollte, ist aus selber dennoch zu ersehen, dass

Digitized by Google

die eigentlichen Auslagen für den benötigten Strom nur sehr minimale sein können, wie denn thatsächlich das auf der Pariser Weltausstellung im Betriebe vorgeführte Modell während der ganzen Zeitdauer der Ausstellung von einer Akkumulatorenbatterie bethätigt wurde, die innerhalb dieses Zeitraumes keinerlei Nachladung erfuhr.

Ist man nun bereits im Besitze der Akkumulatoren, so lassen sich dieselben für alle anderen Zwecke der Telegraphie und der elektrischen Signalisierung mitbenützen, wodurch die heute hiefür verwendeten, im Betriebe kostspieligen und schwierig zu erhaltenden galvanischen Batterien, beseitigt werden können.

Aus den vorhergehenden Erläuterungen zeigt es sich wohl in überzeugender Weise, dass durch die Verwertung relativ starker elektromotorischer Kräfte Apparate robuster Bauart verwendet werden können, welche äusseren Einflüssen Widerstand zu bieten vermögen und nicht leicht in Unordnung geraten, somit eine grosse Funktionssicherheit aufweisen müssen. Es erscheinen sohin bei diesem Signalsysteme die Nachteile der bisher im Gebrauch stehenden, den gleichen Zwecken dienenden Signale, welche in deren zarter Konstruktion und damit verbundenen Empfindlichkeit ihre Grundursache finden, in glücklicher Weise beseitigt. Hingegen muss man allerdings durch die Sachlage gegeben, die Akkumulatoren als unentbehrliche Stromquelle mit in den Kauf nehmen.

Da aber erst hiedurch die nähere Bekanntschaft mit dieser Stromquelle vermittelt werden wird, dürfte es sich auch bald erweisen, dass das dieser Stromquelle bis heute noch immer entgegengebrachte Misstrauen unbegründet ist, wodurch das gegen dieselbe bestehende Vorurteil wohl endgültig verschwinden wird.

Hat auch dieses Blocksignalsystem die praktische Feuerprobe, das einzig massgebende für die Beurteilung des Wertes einer Neuerung, noch nicht überstanden, so bleibt es dennoch auf Grundlage der sehr lange und sorgfältig durchgeführten Versuche unter Verhältnissen, welche der Wirklichkeit sehr nahe kommen, beinahe unzweifelhaft, dass es im praktischen Betriebe die ganz gleiche Funktionsverlässlichkeit wie bei den Versuchen aufweisen wird, vorausgesetzt, dass bei der Montage mit all der hier wie überall notwendigen Sorgsamkeit vorgegangen wird.

Digitized by Google

Magnetismus.

Von

Dr. F. Niethammer,

Chefelektriker.

Mit 57 Abbildungen.

Die magnetischen Eigenschaften der Materialien, die bei der Berechnung von elektrotechnischen Maschinen eine wichtige Rolle spielen, sind der mathematischen Behandlung, wenigstens in einfacher Form, sehr schwer zugänglich. Dennoch besitzen wir dank näherungsweiser Rechnungsmethoden, die den praktischen Bedürfnissen meist vollauf genügen, einen gewissen Einblick in die einschlägigen Verhältnisse, obwohl es bei Forschungen in neuer Richtung sehr beengend wirkt, dass das Vorgehen im wesentlichen empirisch oder bei den verwickelten Grundeigenschaften höchstens tastend und sprungweise spekulativ sein kann.

Magnetischer Kreis. Die erste wichtige und fruchtbringende Beziehung ist das Ohmsche Gesetz für magnetische Kreise. Dasselbe lässt sich in verschiedener Weise zum Ausdruck bringen:

I. $$K = \frac{\frac{4\pi}{10} AW}{W_m} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Dabei ist K der gesamte Kraftlinienfluss, AW die totale Ampèrewindungszahl $\left(\frac{4\pi}{10} AW \text{ die magnetomotorische Kraft}\right)$ und W_m der magnetische Widerstand:

$$W_m = \Sigma \frac{l}{\mu f} = \frac{l_1}{\mu_1 f_1} + \frac{l_2}{\mu_2 f_2} + \ldots \quad \ldots\ldots \quad (2)$$

Digitized by Google

(l die mittleren magnetischen Weglängen der einzelnen Stücke des magnetischen Kreises, f die Querschnitte derselben und μ deren Permeabilitäten.) Es lässt sich auch setzen:

$$\text{II.} \quad \int H \cos \varepsilon \, dl \Big|_{\varepsilon=0} = \int H \, dl = \frac{4\pi}{10} AW = l_1 \frac{K_1}{\mu_1 f_1} + l_2 \frac{K_2}{\mu_2 f_2} + \ldots = \Sigma l \frac{K}{\mu f} \quad \ldots \quad (3)$$

$$\text{III.} \quad \frac{4\pi}{10} AW = B_1 \frac{l_1}{\mu_1} + B_2 \frac{l_2}{\mu_2} + \ldots = \Sigma B \frac{l}{\mu} \quad \ldots \quad (4)$$

$$\text{IV.} \quad \frac{4\pi}{10} AW = \frac{l_1}{\mu_1} \frac{K}{f_1} + \frac{l_2}{\mu_2} \frac{\nu_1 K}{f_2} + \frac{l_3}{\mu_3} \frac{\nu_2 K}{f_3} + \ldots = \Sigma \frac{l_n}{\mu_n} \frac{\nu_{n-1} K}{f_n} \quad \ldots \quad (5)$$

H bedeutet die magnetisierende Kraft, ε den Winkel zwischen H und dl bezw. K oder B, K_1, K_2 sind die Gesamtkraftlinien an den verschiedenen Stellen des Kreises. Die Veränderlichkeit von K wird durch die Streuung bedingt. $B_1 = \frac{K_1}{f_1}$, $B_2 = \frac{K_2}{f_2} \ldots$ sind die Induktionen und zwar ist bei nicht paralleler Richtung der Kraftlinien der Querschnitt eine krumme Oberfläche, die aus den einzelnen, je auf B senkrecht stehenden Elementen besteht. In der Beziehung IV ist angenommen, dass der am meisten reduzierte Kraftlinienfluss K sei; an den übrigen Stellen des Kreises ist er dann unter Zuzählung der Streulinien: $\nu_1 K_1$, $\nu_2 K_2 \ldots$, wobei ν_1, ν_2 grösser als 1 ist. Für praktische Rechnungen setzt man gewöhnlich an Hand von empirisch für die verwendeten Materialien aufgestellten Tabellen oder Kurven

$$\text{V a.} \quad AW_{total} = (AW_1 \text{ pro c}) \times l_1 + (AW_2 \text{ pro c}) \times l_2 + \ldots \quad (6)$$

oder

$$\text{V b.} \quad AW_{total} = 0{,}8 \, [H_1 l_1 + H_2 l_2 + \ldots] \quad \ldots \quad (7)$$

Die resultierenden AW in einem magnetischen Kreise können sich aus verschiedenen Gruppen zusammensetzen. Die einzelnen AW sind entsprechend ihrer räumlichen und zeitlichen Richtung und Grösse unter entsprechenden Winkeln zu kombinieren. Eine besondere Rolle spielen ausser den Haupt-AW besonders die sogen. Reaktions-AW, die in den induzierten Nutzstromkreisen auftreten und die primär auf-

Digitized by Google

gewendeten AW beeinflussen. Auch die in Metallteilen auftretenden schädlichen Wirbelströme wirken als Reaktions-AW. In Fig. 1 ist eine Spule F erregt, mit der Achse senkrecht dazu steht Spule A. Ist

Fig. 1.

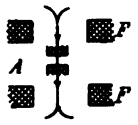


Fig. 2.

letztere unerregt, so laufen die Kraftlinien wie gezeigt; ist sie dagegen erregt, so erfolgt eine Verzerrung nach Fig. 2.

Die Gleichung I geht für einen Kreis, der vollständig aus einem und demselben Material besteht, über in:

$$B f = \frac{\frac{4\pi}{10} AW}{\frac{l}{\mu f}} = \mu H f$$

oder

$$B = \mu H \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

Werte von μ. Für Luft ist $\mu = 1$, für die magnetischen Materialien ist der Wert von Fall zu Fall zu bestimmen. Der Maximalwert von μ, der je gefunden wurde, ist $\mu = 5500$ bei $B = 9000$ für fast reines Eisen [1]). Für Schmiedeeisen ist μ_{max} gewöhnlich 2500 bis 3500, wobei B je nachdem 4000 bis 11000 ist. Stahlguss erreicht wohl dieselben Werte, gewöhnlich ist indes die Permeabilität etwas kleiner. Für gebräuchliches Gusseisen schwankt μ_{max} zwischen 300 und 800, bei $B = 2000$ bis 6000. Schmiedbarer Guss ist etwas besser als Gusseisen, aber schlechter als Stahl. Hämmern, Walzen und Ausziehen verringern unter Umständen die Permeabilität auf einen geringen Bruchteil. Ausglühen verbessert im allgemeinen das Eisen wesentlich. Zahlenmässig lässt sich jedoch der Einfluss der mechanischen Behandlung ebensowenig wie der Einfluss der chemischen Zusammensetzung festlegen. Mit zunehmendem Gehalt an Kohlenstoff, an Mangan, an Silicium (in grossen Mengen), an Antimon, an Nickel und an Chrom nimmt die Permeabilität in der Regel ab. Hadfieldscher Nickelmanganstahl [2]) (25 % Ni, 5 % Mn, 0,8 % C) hat bei Feldstärken H

[1]) Wilson, Proc. Roy. Soc. **62**, p. 369, 1898.
[2]) Wilson, Electrician 1900.

Digitized by Google

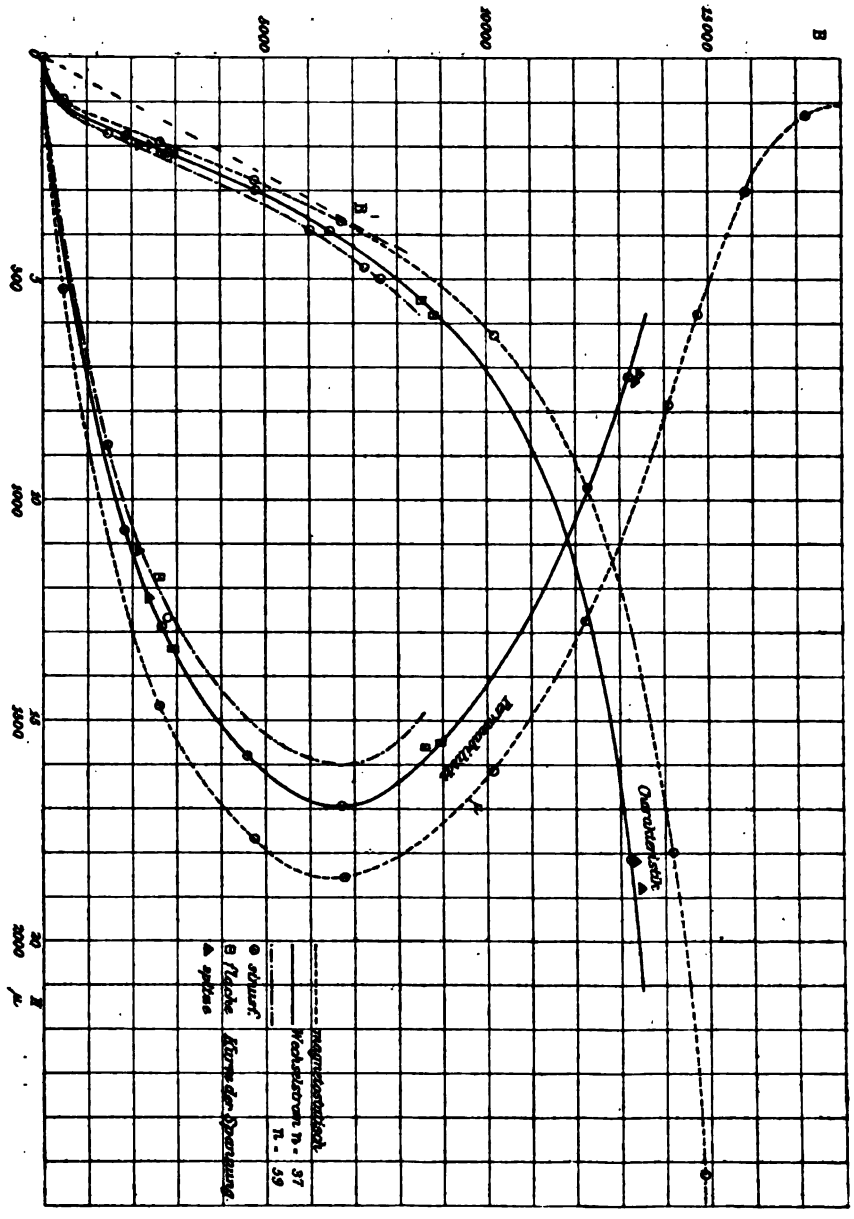


Fig. 3.

zwischen 9 und 50 eine Permeabilität von nur 1,4 bis 2, mit abnehmender Temperatur nimmt allerdings μ zu und bleibt auch beim Wiedererwärmen auf seinem Wert. Eisen mit 43 % Antimon besitzt ein

Digitized by Google

$\mu = 14$, bei 57 % Antimon ist $\mu = 2{,}6$ und bei 74 % $\mu = 1{,}0001$. Bei 10 % Mn und 1 % C wird $\mu = 1{,}4$. Zusätze von Al verschlechtern das Eisen magnetisch sehr stark (μ von Gusseisen sinkt bei 2½ % Al auf die Hälfte).

Der Wert von μ lässt sich für weite Gültigkeitsgrenzen in keine einfache Beziehung zu B oder H bezw. AW bringen. Bei $B = 0$ mit einem Minimum anhebend, wächst μ zunächst sehr stark (Fig. 3[1]) für einen Schmiedeisenring), bis es bei $B = 6000$ bis 7000 ein Maximum erreicht und zwar da, wo eine Ursprungstangente die B-H-Kurve berührt[2]). Von da ab fällt μ wieder rasch, bei hohen Induktionen auf weniger als 2. Für einige sehr hohe Induktionswerte ist nachstehend die Permeabilität angegeben:

Material	B	μ
Stahl	20 000	8
„	22 000	4
Schmiedeisen (a) . .	24 700	6,80
„ „ . .	29 350	3,33
„ „ . .	32 000	2,9
„ „ . .	45 000	1,85
„ (b) . .	60 000	1,50
Gusseisen (a) . . .	25 000	2,5
„ „ . . .	38 700	2,07
„ (b) . . .	41 000	2,1

Die Sättigung von magnetischen Materialien kann nicht durch einen Grenzwert von B oder μ angegeben werden, da B stets mit H noch steigt. Die Sättigung ist durch einen Maximalwert der Magnetisierung $J = \frac{B - H}{4\pi}$ und durch die Susceptibilität $\varkappa = \frac{\mu - 1}{4\pi}$ am richtigsten festgelegt. J_{max} liegt für Schmiedeisen bei 1700, für Gusseisen bei 1250. Der Koëffizient 4π rührt von folgenden Definitionen her:

[1]) Diese und verschiedene andere hier im Verlauf angegebenen Resultate habe ich seiner Zeit am elektrotechnischen Institut der Technischen Hochschule Stuttgart gefunden.

[2]) Es ist an dieser Stelle:

$$\frac{dH}{dB} = \frac{H}{B} = \frac{1}{\mu}.$$

Digitized by Google

Man sagt, von einem Magnet mit dem Magnetismus m gehen $4\pi m$ Kraftlinien aus, also

$$K = 4\pi m.$$

Demnach ist das magnetische Moment (l Magnetlänge)

$$ml = M = \frac{lK}{4\pi}$$

und ferner, wenn f der Magnetquerschnitt

$$\frac{M}{lf} = J = \frac{\frac{K}{f}}{4\pi}.$$

$\frac{K}{f}$ ist bei $H = 0$ gleich B und sonst $= B - H$, also

$$J = \frac{B-H}{4\pi} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (9)$$

Für kleine Werte von H gilt angenähert

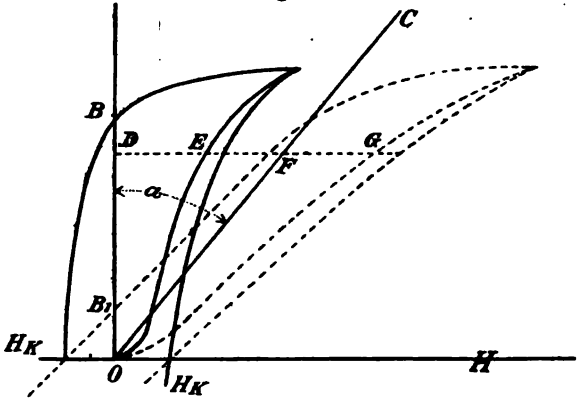
$$\mu = a + bH \quad \ldots\ldots\ldots \quad (10)$$

Für manche Fälle ist angenähert

$$\mu = cB^{2/3} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (11)$$

wobei z. B. für weiches Eisen c = 5,6 bei B zwischen 5000 und 10000.

Fig. 4.

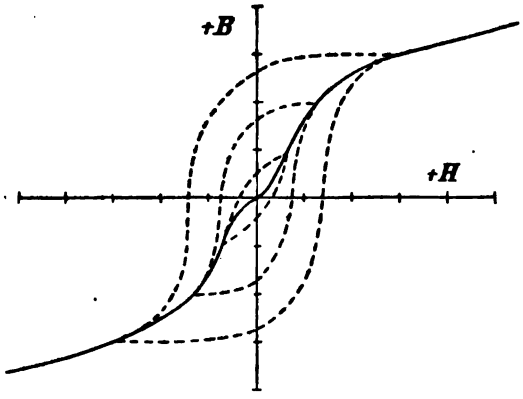


Bei cyklischer Magnetisierung zwischen zwei Grenzwerten von B (Fig. 4, worin die oberen Hälften zweier Magnetisierungsschleifen gezeichnet sind) gehören zu jedem B zwei Werte von μ, je einer auf dem aufsteigenden und einer auf dem absteigenden Ast. Nur zu den

Digitized by Google

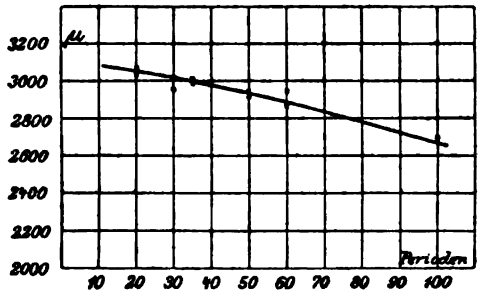
Grenzwerten von B und H gehört ein eindeutiges μ. Für die meisten praktischen Rechnungen bleibt nichts anderes übrig, als sich der Mittel aus beiden Werten oder sich nur des aus den Grenzwerten von B erhältlichen μ's zu bedienen, wie dies aus Fig. 5 ersichtlich ist.

Fig. 5.



Für langsam cyklische (magnetostatische) Magnetisierung ist μ, auf gleiche Induktion bezogen, grösser als bei rascher Ummagnetisierung durch Wechselstrom: In Fig. 3 ist die Permeabilität eines Schmiedeisenringes für langsame Magnetisierung, für 37 und für 59 Perioden verzeichnet. Bei rund 50 Perioden ist die Permeabilität für

Fig. 6.

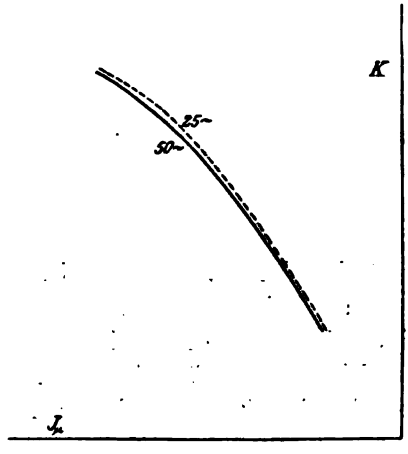


B = 3000 um 14 % kleiner als bei magnetostatischer, bei B = 5000 um 12 %, bei B = 10000 um 15 % und bei B = 13000 um 42 %, bezogen auf die Wechselstromkurve. Wie aus Fig. 3 ebenfalls ersichtlich ist, beeinflusst offenbar die Kurvenform der angewandten EMK. die Permeabilität nicht nennenswert. In Fig. 3 sind B und H direkt

Digitized by Google

aus den aufgenommenen Strom- und Spannungskurven ermittelt. Effektivwerte von Strom und Spannung geben in der Regel unzuverlässige Resultate. Die Kurve Fig. 6 zeigt nach Krogh und Rikli[1]) die Abhängigkeit der Permeabilität von der Periodenzahl bei derselben Induktion 5000. Die mit einem $\times$ bezeichneten Punkte (Fig. 6) entsprechen einer Spannungskurve mit dem Formfaktor 1,06, die mit einem leeren Ring versehenen dem Formfaktor 1,11; diejenigen mit einem vollen Ringe einem solchen von 1,155. Hier nimmt die Permeabilität bei einer Zunahme der Periodenzahl von 20 auf 100 um 13 % ab. Die Differenz ist in der Nähe des Maximums der Permeabilität am grössten. Die Differenzen sind um so grösser, je höher die Periodenzahl und je weicher das Eisen ist. Auch bei drehender Magnetisierung, wie sie in Drehstrommotoren und Gleichstrommaschinen vorkommt, ist nach Fig. 7[2]) eine Abnahme der Permeabilität mit steigender Wechselzahl zu konstatieren. Die Kurven[3]) Fig. 8 gestatten einen interessanten Vergleich: Die B-H-Kurve Nr. 3 wurde vom vollständig unmagnetischen Zustande aus schrittweise mehr und mehr (jungfräulich) magnetisiert. Bei Kurve Nr. 2 wurde nach jeder weiteren Magnetisierung das Probestück stark erschüttert, bei Kurve 1 (ohne unteres Knie) wurde das Stück für jeden Wert von H neu entmagnetisiert.

Fig. 7.



Bei hohen Temperaturen, je nachdem zwischen 690 bis 870° C., verliert das Eisen seine magnetischen Eigenschaften (Permeabilität $\mu = 1$) und zwar äusserst plötzlich. Bis in die Nähe dieses kritischen Punktes ändert sich die Permeabilität nur wenig mit der Temperatur; bei kleinen magnetisierenden Kräften kann sie zwischen 0 und 500° C. pro 10° C. Temperaturzunahme um 3 bis 4 % zunehmen, dieser Prozentsatz vermindert sich mit wachsendem B (B = 4000 bis 10 000 pro 10° C.

[1]) E.T.Z. 1900, p. 1085.
[2]) F. Niethammer, E.T.Z. 1900.
[3]) Franklin und Clark, Phys. Rev. 1899, p. 304.

Digitized by Google

ca. 1 bis 1½ %) und schlägt schliesslich bei hohen Magnetisierungen in eine Abnahme um. Für kleine Werte von H ist auch kurz vor

Fig. 8.

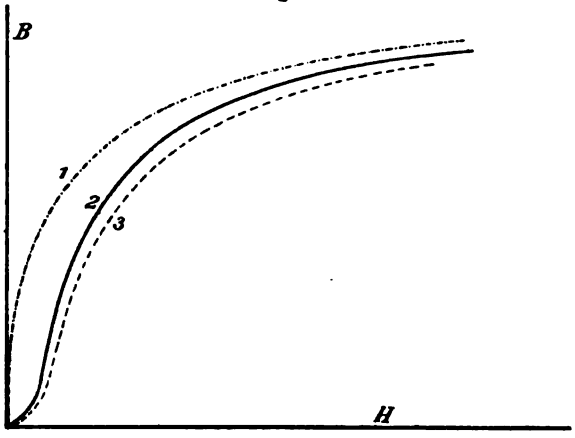
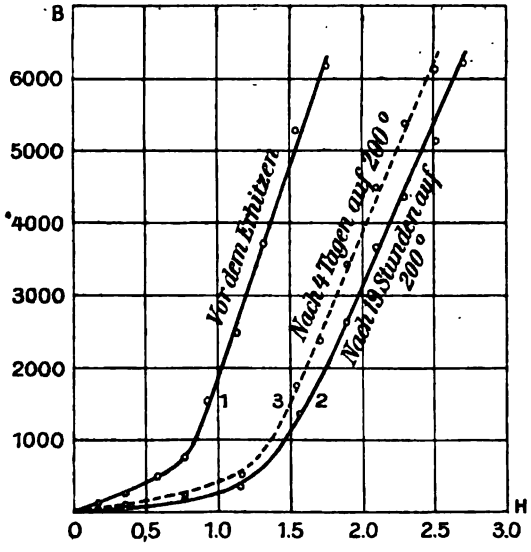


Fig. 9.



der kritischen Temperatur eine sehr starke plötzliche Erhöhung der Permeabilität zu beobachten[1]). Roget[2]) und Dewar finden, dass

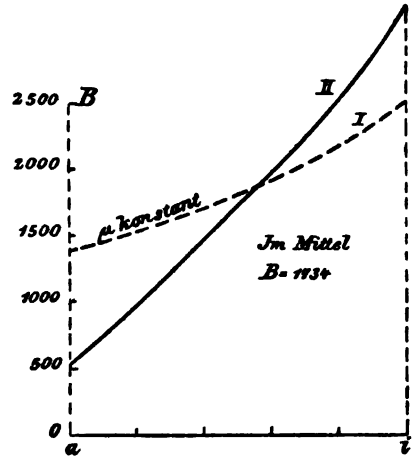
[1]) G. Claude (Comptes rendus 129, p. 409) fand, dass die Permeabilität bei + 25° und — 185° nicht nennenswert verschieden ist.

[2]) Electrician 1898.

Digitized by Google

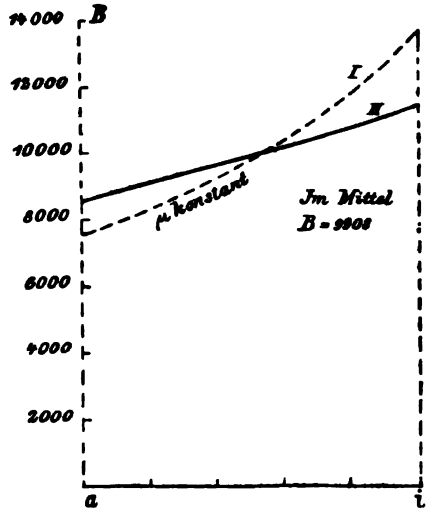
die Permeabilität von weichem Eisen durch anhaltendes Erhitzen auf 200° beträchtlich verkleinert wird (Fig. 9), sie erreicht indes nach

Fig. 10.



einiger Zeit ein Minimum und erholt sich dann bei länger dauernder Erwärmung wieder etwas.

Fig. 11.

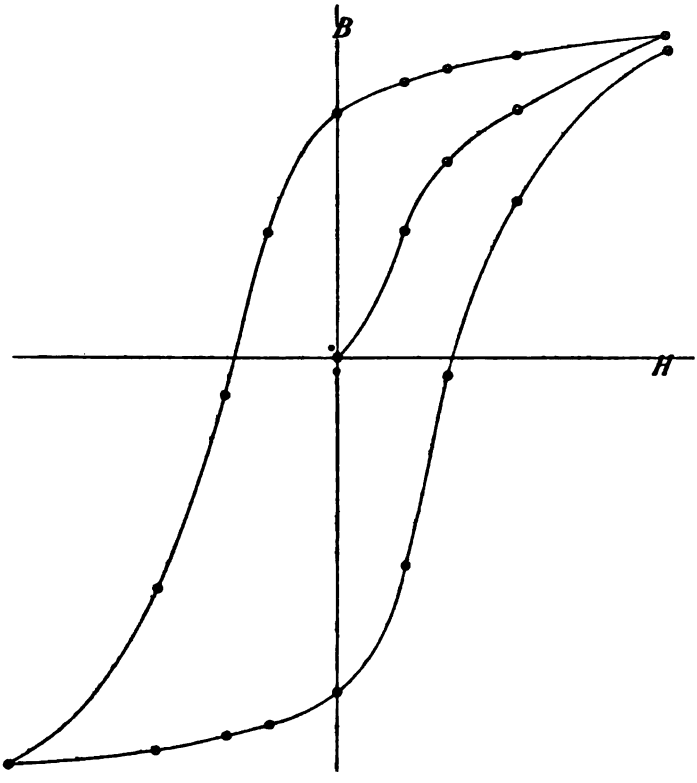


Magnetische Weglängen. In obigen Beziehungen I bis V handelt es sich um eine Reihe einzelner magnetischer Weglängen l; dieselben sind nur einfach zu ermitteln, wenn sämtliche Kraftlinien

Digitized by Google

an den verschiedenen Stellen gleiche Längen haben, was thatsächlich selten der Fall ist. Sind die Weglängen verschieden, so ist die Verteilung der Induktion über den Querschnitt eine ungleichförmige; das variable B_x ist am kleinsten, das zur längsten Länge l_x gehört. Die Permeabilität μ_x ist von Punkt zu Punkt verschieden und zwar vergrössert die Veränderlichkeit der Permeabilität die Ungleichmässigkeit

Fig. 12.



der Verteilung bei kleinen Induktionen (1000 bis 10000 als Grenze), bei hohen Induktionen wirkt sie ausgleichend. Der Ausdruck $\frac{B_1}{\mu_1} l_1$ in obigen Gleichungen ist zu ersetzen durch $\int B_{x1} \frac{l_{x1}}{\mu_{x1}}$, über den Querschnitt zu integrieren, wobei $\int B_{x1} d_{x1}$ über den ganzen Querschnitt $= K_1$ sein muss. Diese Operation ist gewöhnlich nur graphisch und durch mühsames Probieren zu lösen. Für einen Schmiedeisenring aus

Digitized by Google

Dynamoblechen mit einem äusseren Durchmesser = 282 mm und einem inneren = 155 mm ist diese Arbeit in Fig. 10 und 11 für die beiden mittleren Induktionen B = 1734 und 9908 durchgeführt. Falls B_m die mittlere Induktion, l_m die mittlere Weglänge und μ_m die mittlere Permeabilität ist, wird B_x an irgend einer Stelle

$$B_x = B_m \frac{l_m}{l_x} \frac{\mu_x}{\mu_m}.$$

Für einen geschlossenen Eisenring vom äusseren Umfang l_a und vom inneren Umfang l_i ergibt sich die mittlere magnetische Weglänge l zu [1])

$$l = \frac{l_a - l_i}{\log_{nat} l_a - \log_{nat} l_i} = \frac{l_a + l_i}{2} \left[1 - \frac{(3l_i - l_a)(l_a - l_i)^2}{12 l_i^2 (l_a + l_i)}\right] \quad (12)$$

Gut auf einander gepasste Stossfugen eines geschlossenen Kreises kann man nach Ewing folgendermassen durch einen Luftspalt von der Länge l ersetzen:

B	l
4000 bis 15 000	0,003 bis 0,005 c.

Bei stärkerem Drucke reduzieren sich die Werte noch.

Ueber den Uebergangswiderstand in Pressflächen aus verschieden magnetischem Material (z. B. Stahl auf Gusseisen) liegen noch keine Versuchswerte vor.

Remanenz. Bei cyklischer Magnetisierung heisst der bei aufgehobener magnetisierender Kraft zurückbleibende Magnetismus $OB = B_r$ (Fig. 4) Remanenz; derjenige Wert von H, bei dem der Magnetismus vollständig verschwindet, heisst Koercitivkraft $OH_k = H_k$. Während die ausgezogene Kurve einem eisengeschlossenen Kreis entspricht, ist bei der gestrichelten ein Luftspalt vorgesehen, durch welchen die Kurven um einen Winkel α gedreht (geschert) werden. Tg α entspricht an jeder Stelle dem Verhältnis der magnetisierenden Kraft für den Luftspalt zur Induktion. Die Scherlinie OC gibt in ihren Abscissen die Abscissendifferenz der beiden Kurvensysteme gegeneinander: $DG - DE = DF$. Die Remanenz OB_r wird durch den Luftspalt ganz erheblich reduziert. In der Fig. 4 ist auch die vom Ursprung ausgehende Kurve der erstmaligen Magnetisierung eingezeichnet, sie schliesst sich an die Spitze des geschlossenen Cyklus an, ein Bild, das allerdings nicht ganz der Wirklichkeit entspricht, da sich die

[1]) Bei $l_i = 0{,}6\, l_a$ ist die Korrektion nur 2% (Uppenborns Kalender).

Digitized by Google

Schleife erst nach mehrfacher cyklischer Ummagnetisierung vollständig schliesst. Die erstmalige Magnetisierung mit anschliessendem ersten Cyklus verläuft beispielsweise nach Fig. 12. Für denselben Schmiedeisenring, für den in Fig. 3 die Magnetisierungskurven niedergelegt sind, ist in Fig. 13 der Verlauf der Remanenz B_r und der Koercitivkraft H_k in Abhängigkeit der magnetisierenden Kraft gegeben. In Fig. 14 ist ein massiver Gussring verschiedenemale von $H = 0$ bis 16 und wieder zurück zu $H = 0$ ummagnetisiert. Es ist ersichtlich, wie das maximale B bei gleichem $H = 16$ allmählich erheblich ansteigt; die Remanenz ist zunächst 60 und wird dann 110 etc. Die Magnetisierungscharakteristik (Fig. 15) erhält man, wenn man für zusammengehörige Werte von B und H nicht volle Cykel (Fig. 5), sondern solche mit einer Aenderung von H zwischen einem Maximum und Null benützt. Die Ordinaten in Fig. 15, die zum selben Eisen wie Fig. 5 gehören, sind somit die Differenz zwischen der maximalen Induktion an der betreffenden Stelle und der Remanenz.

Die Remanenz eines Eisenstückes ist grösser, wenn der Magnetismus allmählich, als

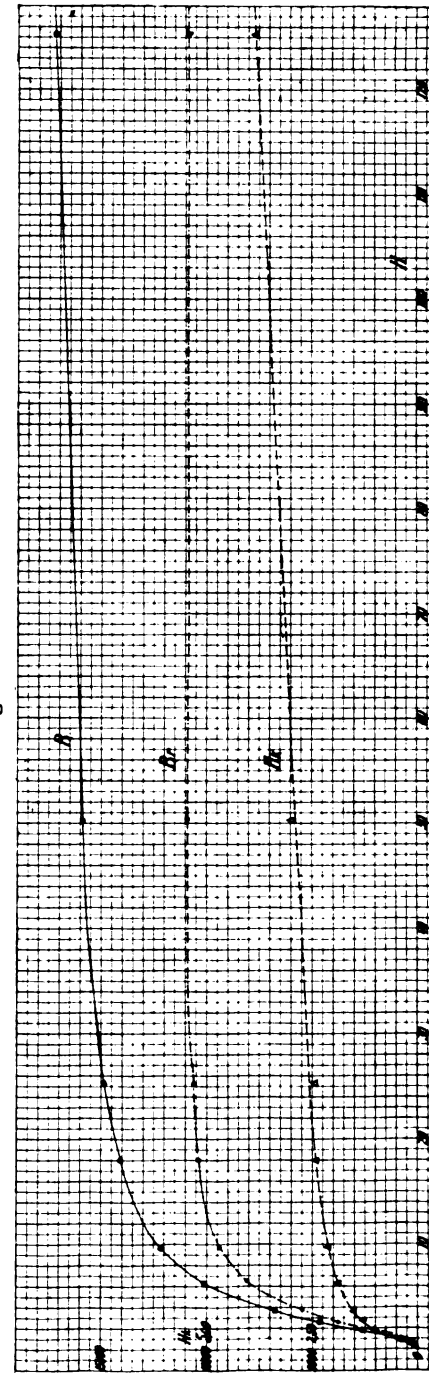
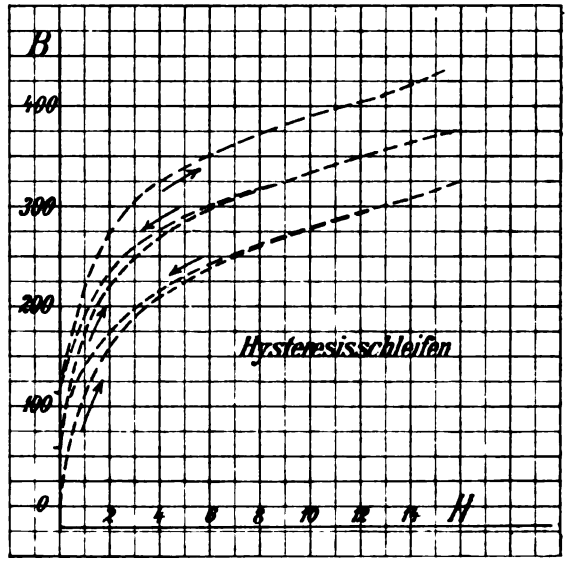


Fig. 13.

Digitized by Google

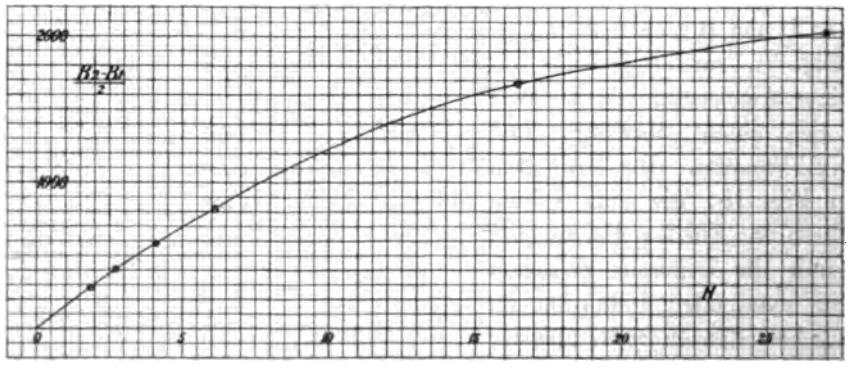
wenn er plötzlich verschwindet. Ueber den Unterschied zwischen stetiger und unstetiger Magnetisierung finden Gumlich und Schmidt, E.T.Z. 1900, dass der magnetische Zustand bei weichem Eisen

Fig. 14.



durch sprungweise Aenderung der Feldstärke in demselben Sinn beeinflusst wird wie durch äussere Erschütterungen: Während die

Fig. 15.



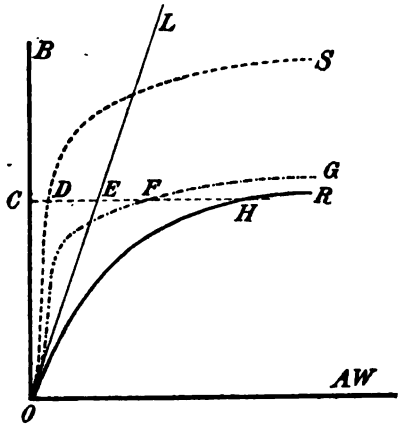
maximale Induktion bei höheren Feldstärken nicht merklich geändert wird, nimmt der remanente Magnetismus, die Koercitivkraft und auch die Energievergeudung (siehe später) mit der Grösse der Sprünge ab.

Digitized by Google

Remanente Magnetisierung geht durch Erschütterungen leicht verloren. Abgesehen von der hysteretischen Schleifenbildung bei cyklischer Ummagnetisierung lässt sich besonders bei niedrigen Magnetisierungen ein magnetisches Kriechen beobachten, d. h. das Feld erreicht nicht augenblicklich den dem neuen Felde entsprechenden Wert. Die Ursache hierfür liegt teilweise in der durch die Selbstinduktion der Magnetisierungsspulen bedingten Extraströme, teilweise in den im Eisen induzierten dämpfenden Wirbelströmen.

Harter Stahl, besonders chrom- oder wolframhaltiger, besitzt grosse Koercitivkraft, was ihn besonders für permanente Magnete geeignet macht. In Bezug auf Hysteresis ist allerdings eine grosse Koercitivkraft sehr nachteilig (siehe später). Während weiches Schmied-

Fig. 16.



eisen Werte von $H_k = \frac{1}{2}$ bis 3 CGS besitzt, hat gewöhnlicher Stahl 20 bis 50.

Hat man es mit einem magnetischen Kreis zu thun, der aus verschiedenen magnetischen Materialien besteht, so kann man die Gleichungen I—V für eine Reihe magnetisierender Kräfte graphisch addieren: In Fig. 16 gibt z. B. Kurve G die AW für den aus Gusseisen bestehenden Teil, S den für Schmiedeisen und L (geradlinig) den für Luft; die Zusammensetzung aller drei Kurven gibt die resultierende Magnetisierungscharakteristik $R : CH = CD + CE + CF$. Für manche praktische Fälle lässt sich diese Resultierende angenähert nach Frölich darstellen durch die Gleichung:

$$B = \frac{AW}{a + b\,AW} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (13)$$

Digitized by Google

Beziehungen für H und B. Obwohl die Beziehungen für den magnetischen Kreis die für die Elektrotechnik weitaus wichtigsten sind, stelle ich hier noch einige andere Ausdrücke für magnetisierende

Fig. 17.

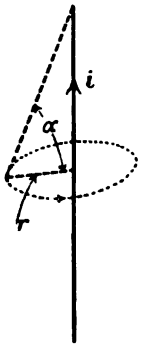
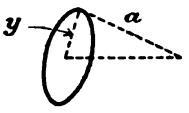


Fig. 18.



Kräfte und Induktionen zusammen, die z. B. in der Messtechnik eine gewisse Rolle spielen. Das zirkulare Feld in der Mitte eines Stromleiters im Abstand r (Fig. 17) ist (i in Ampère):

$$H = \frac{2\,i \sin \alpha}{10\,r} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (14)$$

Ist der Leiter unendlich lang, so wird

$$H = \frac{2\,i}{10\,r} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (15)$$

In der Mitte einer sehr langen Spule (Länge l) von iz magnetisierenden Ampèrewindungen ist

$$H = \frac{4\pi}{10}\,\frac{iz}{l} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (16)$$

Gegen das Ende der Spule nimmt das Feld ab.

Eine ganz flache Spule (Fig. 18) erzeugt im Mittenlot eine Feldstärke

$$H = \frac{2\pi i y^2}{10\,a^3}\Bigg|_{y=a} = \frac{2\pi i}{10\,a}, \quad \ldots\ldots \quad (17)$$

ein beliebiges reguläres, flaches Polygon von x Seiten und dem Umfang l im Mittelpunkt eine Feldstärke

$$H = \frac{0{,}4\,i}{l}\,\pi^2 \left\{\frac{\sin\frac{\pi}{x}}{\frac{\pi}{x}}\right\}^2 \frac{1}{\cos\frac{\pi}{x}} \quad \ldots\ldots \quad (18)$$

Digitized by Google

Setzt man ein Ellipsoid mit der Permeabilität μ einer gleichförmigen Feldstärke H aus, so entsteht eine Induktion

$$B = \frac{H}{\frac{1}{\mu} + \frac{x}{4\pi}\left(1 - \frac{1}{\mu}\right)}; \quad \ldots\ldots \quad (19)$$

dabei ist

$$x = 4\pi\left(\frac{1}{e^2} - \frac{\sqrt{1-e^2}}{c^3 \sin e}\right),$$

wenn $c < a$, und

$$x = 4\pi\left(\frac{1}{e^2} - 1\right)\left(\frac{1}{2e}\log_{nat}\frac{1+e}{1-e} - 1\right),$$

wenn $c > a$,

$$e = \sqrt{1 - \frac{c^2}{a^2}}.$$

c und a sind die Halbachsen, c diejenige Achse, die parallel dem Feld verläuft. Für die Kugel wird

$$x = \frac{4}{3}\pi$$

und, was der wichtigste Fall ist, für einen langen Cylinder $x = 2\pi$, sowie für eine ganz flache Schale $x = 4\pi$.

Bei diesen Entwicklungen geht man von der Anschauung aus, dass das Ellipsoid eine entmagnetisierende Kraft $yJ = y\frac{B-H}{4\pi}$ ausübt, so dass statt der aufgewendeten magnetisierenden Kraft H nur $H - yJ$ wirksam wird, d. h.

$$B = \mu\,(H - yJ),$$

wobei

$$y = \frac{4\pi x}{4\pi - x}.$$

Bringt man in eine lange Spule einen Eisenkern, so ist die Berechnung der auftretenden Induktion bezw. des gesamten magnetischen Widerstandes ziemlich verwickelt, da der Luftquerschnitt und der mittlere Luftweg schwer genau bestimmbar sind. Sind F die freie Oberfläche des Eisenkernes, d. h. die aus der Spule herausragende Eisenoberfläche, l_s die Spulenlänge, l_k die Kernlänge, $f = a \cdot b$ der rechteckige Kernquerschnitt, μ die Permeabilität im Eisen und iz die magnetisierenden AW, so ist der Flux (experimentell ermittelt)

Digitized by Google

$$K = \frac{\frac{4\pi}{10} i z}{\frac{0{,}5}{\sqrt{F}} + \frac{l_k}{\mu f}} \quad \ldots\ldots (20)$$

(bei Wechselstrom K und i Maximalwerte) und

$$F = (l_k - l_s)(a + b) + f.$$

Bei $B \leqq 15000$ im Kern ist gewöhnlich $\frac{l_k}{\mu f}$ für Schmiedeisen vernachlässigbar.

Für einen runden Eisenkern in einer Spule kann man die wirksame Feldstärke unter Anwendung eines Entmagnetisierungsfaktors [1]) berechnen zu

$$H = \frac{4\pi i z}{l} - \frac{4\pi}{y^2} J (\log_{nat} 2y - 1), \quad \ldots\ldots (21)$$

$$y = \frac{\text{Kernlänge}}{\text{Kerndurchmesser}}, \; l = \text{Spulenlänge}, \; J = \frac{B - H}{4\pi},$$

$$B = \mu H.$$

Es ist klar, dass die Induktion in einem in einer Spule steckenden Eisenkern von der Spulenmitte nach aussen immer mehr abnimmt. Gill [2]) fand, dass sich der Wert von B an irgend einer Stelle im Abstand x von der Stab- und Spulenmitte bestimmen lässt aus

$$\left(\frac{B}{B_{max}}\right)^{5/4} + \left(\frac{x}{a}\right)^2 = 1, \quad \ldots\ldots (22)$$

falls 2a die Stablänge und B_{max} die Induktion in der Mitte ist.

Streuung. Bringt man auf einem geschlossenen Eisenring (Fig. 19) an irgend einer Stelle eine magnetisierende Spule S auf, so nimmt das Feld in dem Ring mit der Entfernung von S ab und wird an der Oppositionsstelle N ein Minimum: ein Teil der innerhalb der Spule erzeugten Kraftlinien, die Streulinien, schliessen sich durch die Luft. Bringt man an der Oppositionsstelle noch einen Luftspalt an, so vergrössert sich die Streuung damit wesentlich. Für einen solchen Ring ist als Polardiagramm in Fig. 20 [3]) die Kraftlinienverteilung ge-

[1]) Grawinkel und Strecker, Hilfsbuch der Elektrotechnik.

[2]) Phil. Mag. 46, p. 478, 1898.

[3]) Vom Verfasser vor Jahren am Elektrotechnischen Institut Stuttgart aufgenommen.

Digitized by Google

zeichnet; in S sitzt die lokal erregende Spule. OB_0, OB_{30}... sind die Induktionswerte an den zugehörigen Ringstellen. In rechtwink-

Fig. 19.

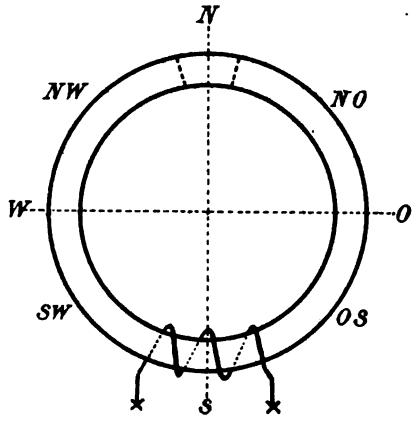
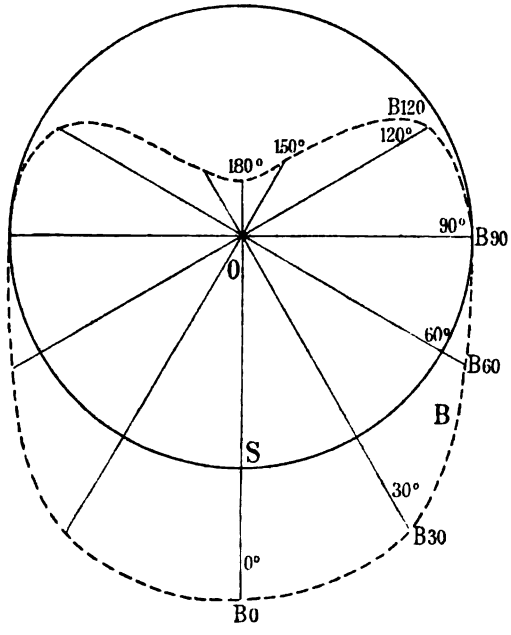


Fig. 20.



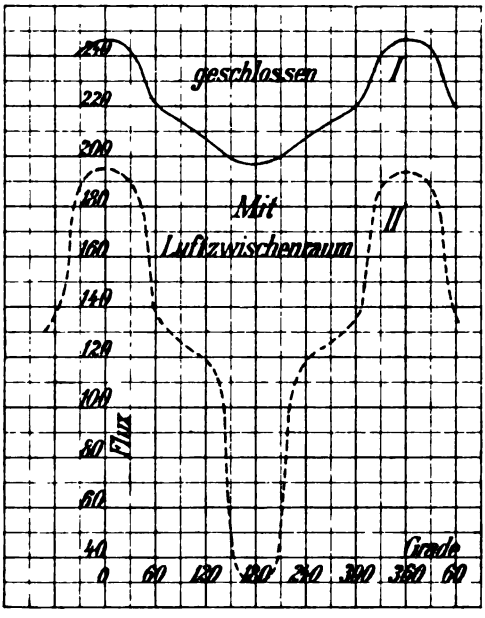
ligen Koordinaten verläuft die Kraftlinienverteilung über dem abgewickelten Ring nach Fig. 21, und zwar entspricht die Kurve II der

Digitized by Google

Fig. 21 mit Luftspalt bei 180° bezw. bei N (Fig. 19) und Kurve I dem ganz geschlossenen Ring bei gleicher Erregung. Der Streukoëffizient ist für den geschlossenen Ring 1,25. Sucht man für die Kraftlinienkurve die Neigungswinkel β gegen die Abscissenachse, so ist an jeder Stelle tg β den gestreuten Kraftlinien proportional.

In den meisten praktischen Fällen wird man das Feld innerhalb der Spule mit Gesamt- oder Maximalfeld, das Feld im Luftspalt als Nutzfeld und das aussen verlaufende Feld Streufeld heissen. Streufaktor ist das Verhältnis Gesamtfeld : Nutzfeld, in manchen Fällen

Fig. 21.



auch Streufeld : Nutzfeld. Das Streufeld berechnet man wie die Hauptfelder als Quotient aus magnetomotorischer Kraft und magnetischem Widerstand; diese Berechnung stösst allerdings bei den praktisch vorkommenden verwickelten Formen auf einige Schwierigkeit.

Du Bois gibt in seinem Werke „Magnetische Kreise“ eine Reihe Versuche von Lehmann über Streuungsverhältnisse an einem aufgeschlitzten Eisenring an. Der untersuchte Ring hat einen mittleren Durchmesser $= 2\,r_1$ von 15,92 c und einen kreisrunden Querschnitt von $r_2^2\,\pi = 2{,}52\ c^2$. Bei einem Luftspalt von $\delta = 0{,}103$ c findet sich folgende Tabelle, worin ν das Verhältnis der mittleren Kraftlinien-

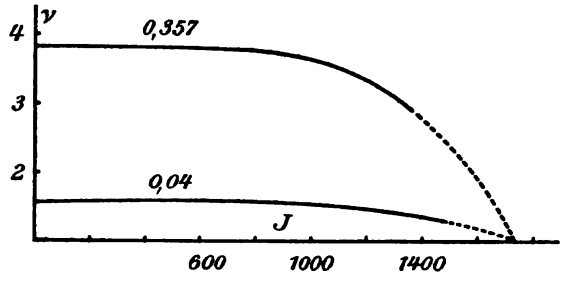
Digitized by Google

zahl — sonst ist die maximale üblich — im Eisenring zum Flux im Luftspalt, der Streufaktor ist.

H	B	ν
2,4	1 470	1,82
8,9	6 200	1,81
27,2	13 000	1,74
78,5	16 000	1,59
267	18 900	1,47

Den Luftspalt und die dadurch bedingte Verminderung des Fluxes

Fig. 22.



und das Streufeld fasst Du Bois als entmagnetisierende Wirkung wie beim Ellipsoid zusammen in die Beziehung

$$H' = H - yJ, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (23)$$

worin H die aufgewendete magnetisierende Kraft und H′ die wirksame, $J = \frac{B - H'}{4\pi}$ die Magnetisierung und

$$y = \frac{2\delta}{\left(r_1 - \frac{\delta}{2\pi}\right)\nu} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (24)$$

ist. Für ν findet er für obigen Ring die empirische Beziehung

$$\nu = 1 + 7\,\frac{\delta}{r_2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (25)$$

und zwar, wie Fig. 22 zeigt, nur giltig bis etwa $J = \frac{B - H}{4\pi} = 800$, dann nimmt ν ab bis auf annähernd 1 bei J = 1750. Die obere Kurve (Fig. 22) gilt für einen Luftspalt δ = 0,357 c, die untere für δ = 0,04.

Digitized by Google

Die Kraftlinienverteilung über den Ring (Fig. 19) ist folgendermassen gegeben:

δ	$J = \frac{(B - H)}{4\pi}$	K_S	$K_{OS=SW}$	$K_{O=W}$	$K_{WO=OW}$	K_N
0,103	492	17 100	16 650	15 850	14 400	8 610
—	988	33 560	32 850	32 100	29 400	18 000
—	1525	48 000	48 000	48 000	48 000	32 500
0,357	503	18 800	17 900	16 200	13 500	4 160
—	1455	46 350	46 100	—	45 800	16 800

Oberbeck fand an einem Ring, der auf 24° mit einer Spule bedeckt war,

$$K_s = 100, \quad K_o = K_w = 93, \quad K_n = 91.$$

Wurden diametral zwei Spulen von 18° aufgebracht, so wurde

$$K_s = K_n = 100,$$
$$K_o = K_w = 98.$$

Zur Berechnung der Streuung in technisch üblichen Apparaten eignen sich nachstehende Beziehungen von Forbes. Die magnetische Leitfähigkeit zwischen zwei Flächen q_1 und q_2 (Fig. 23) ist

$$\lambda = \frac{q_1 + q_2}{2s}, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (26)$$

zwischen den zwei oberen Flächen (Fig. 24) entweder

$$\lambda = \frac{l}{\pi} \log_{nat} \frac{s_2}{s_1} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (27)$$

oder nach Fig. 25

$$\lambda = \frac{l}{\pi} \log_{nat} \left[1 + \frac{\pi (s_2 - s_1)}{2 s_1}\right] \ldots \ldots \quad (28)$$

S. Thompson (Der Elektromagnet) entwickelt für zwei unendlich lange parallele Schenkel (Fig. 26)

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\pi \mu} \log_{nat} \frac{2a}{(b + 2a - \sqrt{b^2 + 4ab})} \quad \ldots \quad (29)$$

Dabei ist μ die Eisenpermeabilität.

In manchen Fällen wird man von einer nützlichen Streuung sprechen können, dann nämlich, wenn Streulinien das Hauptfeld da wieder treffen, wo es nutzbar sein soll.

Digitized by Google

Eine eingehende Untersuchung eines lokal erregten geschlossenen Eisenrings und eines Eisenstabs hat Lehmann ballistisch und mit Wechselstrommagnetisierung (Diss. Zürich) ausgeführt; er findet:

Der zeitliche Verlauf der magnetischen Induktion an einem lokal erregten Eisenring zeigt eine mit der Entfernung von der Erregerspule zunehmende Phasenverspätung; die Maximalamplituden fallen von der

Fig. 23.

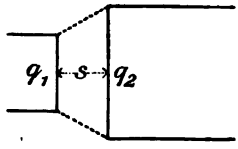
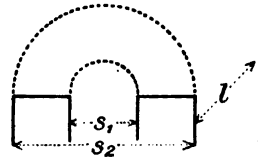


Fig. 24.



Erregungsstelle nach der Oppositionsstelle zu rasch ab, am stärksten für kleine Induktionswerte. Ausserdem erscheint für Wechselstromerregung bei einer sekundlichen Wechselzahl von 123 gegenüber langsam, stufenweise variierender Erregung und sonst gleicher Anordnung der zeitliche Verlauf der magnetischen Induktion relativ in der Phase

Fig. 25.

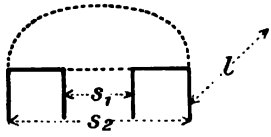
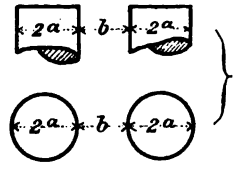


Fig. 26.



verspätet mit etwas kleineren Amplituden. Für mittlere Induktionswerte steigt diese Phasendifferenz von rund $\frac{T}{360}$ an der Erregerstelle zu $\frac{T}{200}$ an der Oppositionsstelle, die Amplitudendifferenz resp. von 1,7 % zu 3,1 %.

Es lässt sich auch am lokal erregten Eisenstabe eine gleichsinnige Abweichung der nach beiden Methoden erhaltenen Beobachtungsresultate konstatieren. Die Maximalwerte der Induktion bei der Wechselzahl 120 fielen durchweg kleiner aus als die entsprechenden bei sehr langsamer Ummagnetisierung, und zwar in Beträgen von 1,3 % für die Stabmitte, bis zu 2,4 % für 50 cm Entfernung davon. Die Induktionen bei Wechselstrom erschienen in Bezug auf die ballistischen verspätet, für die Mitte um 0,7 °, für die Entfernung 50 cm um 1,4 °.

Digitized by Google

Elektromotorische Kraft. Den Uebergang von Feldern bezw. Kraftlinien K auf elektrische Spannungen bezw. elektromotorische Kräfte oder Potentialdifferenzen e geben die Maxwellschen Beziehungen:

1. Wird ein Leiterelement d l in einem Felde B (Fig. 27) um d s bewegt, so wird induziert:

$$e = \frac{B \cdot dl \cdot ds \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta}{dt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (30)$$

oder

$$e = \frac{dK}{dt}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (31)$$

d. h. e ist proportional der in der Zeiteinheit von dem Leiter geschnittenen Kraftlinienzahl.

2. Hat man es mit einer Spule von z Windungen zu thun, so wird induziert:

$$e = z \frac{dK}{dt}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (32)$$

d. h. e ist $= z \times$ der sekundlichen Aenderung der umfassten Kraftlinien.

Für die Richtung der induzierten E.M.K. gilt die Fingerregel an der rechten Hand: Zeigfinger Richtung von K, Daumen Bewegungs-

Fig. 27.

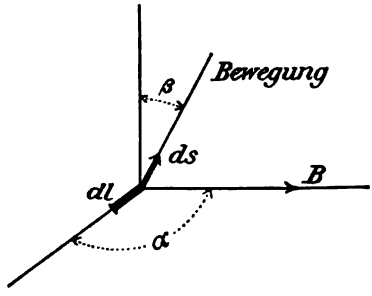
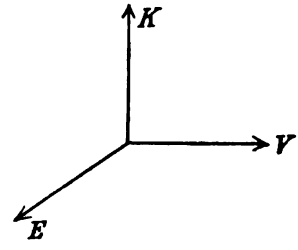


Fig. 28.



richtung V, Mittelfinger Richtung von E (Fig. 28). Ferner: Nimmt die eine Spule durchsetzende Kraftlinienzahl zu, so entsteht eine E.M.K. im Uhrzeigersinn, falls man sie in der Kraftlinienrichtung betrachtet. Die Kraftlinienrichtung ist stets so zu definieren, dass die Kraftlinien aus einem Nordpol austreten und zum Südpol zurückkehren, um innerhalb des Magneten wieder den Nordpol zu erreichen. Hier ist auch noch anzufügen: Ein Solenoid oder ein Elektromagnet hat seinen

Digitized by Google

Nordpol auf der Seite, von wo aus gesehen der erregende Strom gegen den Uhrzeigersinn verläuft; oder nimmt man ein Solenoid derart in die rechte Hand, dass der Strom in der Richtung von vier Fingern fliesst, so gibt der Daumen die Kraftlinienrichtung.

Um die Feldrichtung zirkulär um einen Stromleiter zu finden, denke man sich denselben mit der rechten Hand gepackt; fliesst der Strom in Richtung des Daumens, so folgt das Feld der Richtung der übrigen Finger.

Das Lenzsche Gesetz besagt, dass in einem geschlossenen Leiter bei der Bewegung durch ein Magnetfeld solche Ströme induziert werden, die auf die Bewegung hemmend einwirken.

In Fig. 29 ist der zu den gegebenen periodischen Spannungskurven e (Fig. 30) gehörige Kraftlinienverlauf $K = \int e\,dt$ nach Benischke (E.T.Z. 1901) gezeichnet. Die Kraftlinienkurve ist die Integralkurve der e-Kurve und letztere die Differenzialkurve der ersteren. e ist Null, wenn die Tangente an die K-Kurve horizontal verläuft.

Legt man an eine Spule mit Eisenkern eine Spannung e, so gilt die Beziehung

$$e - z\frac{dK}{dt} = iw, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (33)$$

falls i der Momentanwert des Stromes und w der Wickelungswiderstand ist. Die Lösung dieser Gleichung ist wegen der veränderlichen Eisenpermeabilität sehr schwierig. Ist z die Windungszahl der Spule und $\operatorname{tg}\varphi = \frac{dK}{d(iz)}$ (φ die Neigung der B-H-Kurve), so geht obige Beziehung über in

$$e - z^2 \operatorname{tg}\varphi \frac{di}{dt} = iw \quad \ldots\ldots\ldots \quad (34)$$

Um eine Lösung zu ermöglichen, kann man stets angenähert setzen

$$e = A_0 + A_1 \sin 2\pi nt + A_2 \sin 4\pi nt + A_3 \sin 6\pi nt + \ldots^1),$$

$$K = \frac{iz}{a + biz},$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{a}{(a + biz)^2}.$$

In Fig. 31 ist für einen Eisenring mit Erregerspule aufgenommen: Die Kurve e der angelegten Klemmenspannung, daraus der Kraft-

[1]) A_0 und die geraden Glieder meist zu vernachlässigen.

Digitized by Google

Fig. 29.

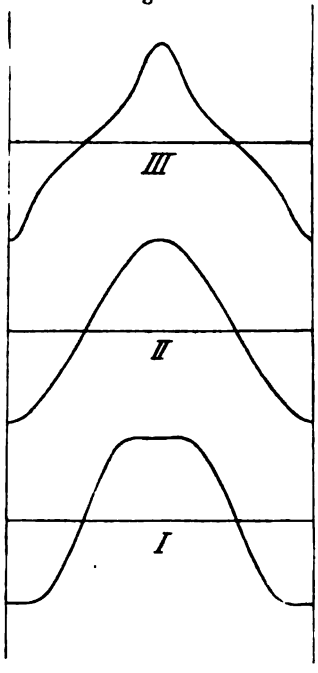
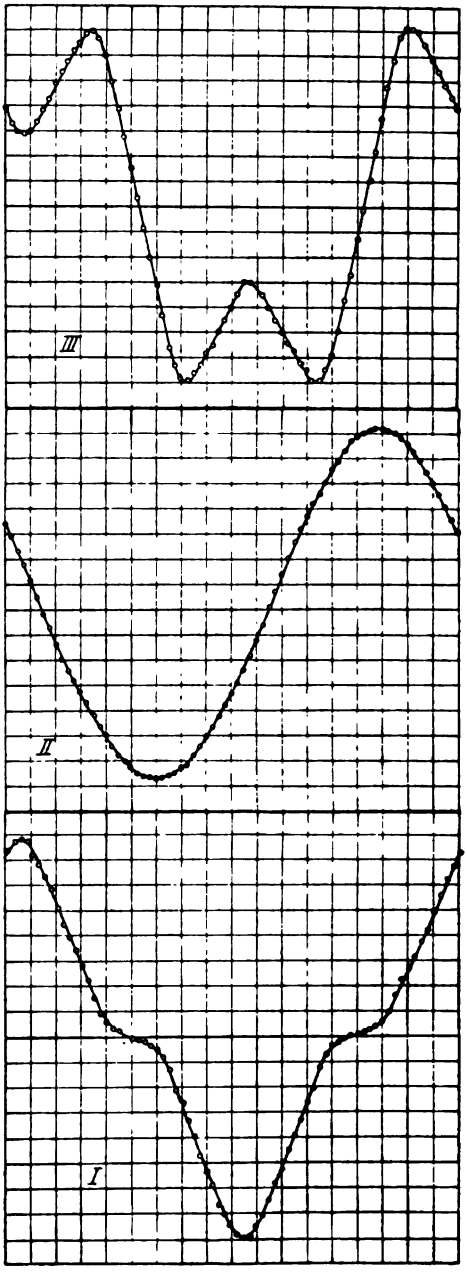
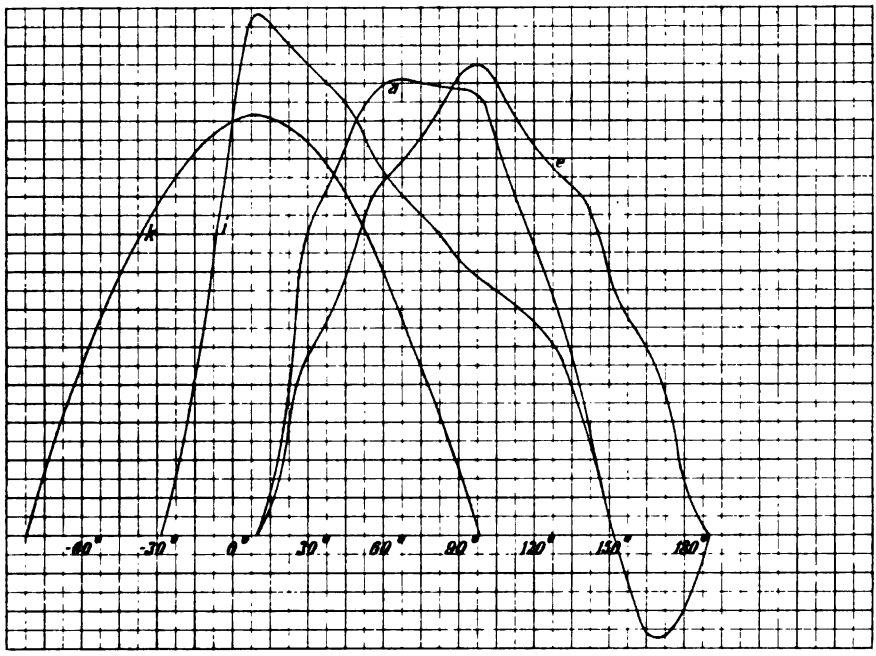


Fig. 30.



Digitized by Google

Fig. 31.



linienverlauf $k = \int e\,dt$, ferner der Stromverlauf i und die Arbeitskurve $a = i \cdot e$.

Induktionskoëffizienten. In der Gleichung (34) wird häufig gesetzt:

$$z^2 \operatorname{tg} \varphi = L_s \quad \ldots\ldots\ldots \quad (35)$$

L_s ist der sogenannte Selbstinduktionskoëffizient, definiert durch die Beziehung

$$L_s \frac{di}{dt} = z \frac{dK}{dt} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (36)$$

oder

$$L_s = z \frac{dK}{di} = z^2 \operatorname{tg} \varphi = c\,z \frac{dB}{dH} \quad \ldots\ldots \quad (37)$$

oder

$$L_s = \frac{1{,}26\ z^2}{\text{Magnet. Widerstand}} = \frac{1{,}26\ z^2}{\Sigma \frac{1}{\mu} \frac{l}{q}} \quad \ldots\ldots \quad (38)$$

Ist K proportional i, so wird

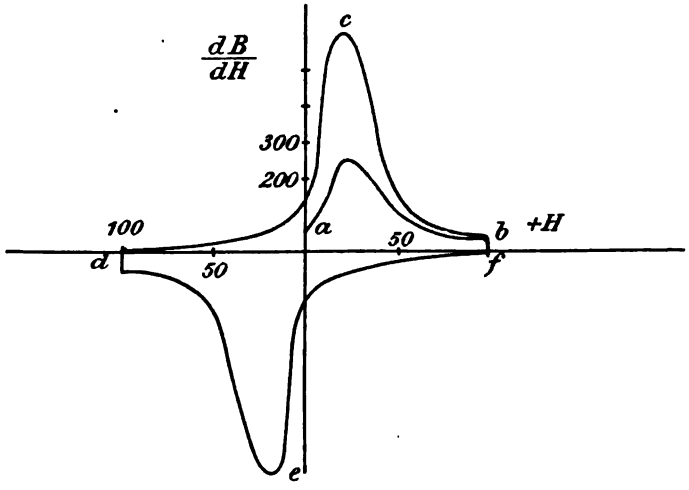
$$L_s i = z K \quad \ldots\ldots\ldots \quad (39)$$

L_s ist gleich der beim Strom $i = 1$ umfassten Gesamtkraftlinienzahl.

Digitized by Google

L_s wird für Kreise mit Eisen äusserst variabel; in Fig. 32 ist nach Du Bois der Verlauf von $L \sim \frac{dB}{dH}$ entsprechend einer erstmaligen Magnetisierung und einem Magnetisierungscyklus in Abhängigkeit

Fig. 32.



von H als Linie a b c d e f gezeichnet, woraus erhellt, dass es zweckmässig ist, den Selbstinduktionskoëffizienten, wo immer möglich, zu vermeiden.

Als Lösung obiger Gleichung (34)

$$e - L_s \frac{di}{dt} = i w \quad \ldots \ldots \quad (40)$$

findet sich bei konstantem L_s für einen entstehenden Gleichstrom (e wächst von 0 bis E)

$$i = \frac{E}{w} \left\{ 1 - \varepsilon^{-\frac{w}{L_s} t} \right\}, \quad \ldots \ldots \quad (41)$$

für einen auslaufenden Gleichstrom ($\varepsilon = 2{,}718$)

$$i = \frac{E}{w} \varepsilon^{-\frac{w}{L_s} t}, \quad \ldots \ldots \quad (42)$$

für eine sinusförmige Wechselspannung $e = E_{max} \sin \omega t$ im Dauerzustand

$$i = \frac{e}{\sqrt{w^2 + 4\pi^2 L_s^2 n^2}} \quad \ldots \ldots \quad (43)$$

Digitized by Google

oder als Effektivwerte

$$J = \frac{E}{\sqrt{w^2 + 4\pi^2 L_s^2 n^2}} \quad \ldots\ldots \quad (44)$$

Ist L_s, wie gewöhnlich, variabel, so ist $L_s \frac{di}{dt}$ zu ersetzen durch

$$\frac{d(L_s i)}{dt} = L_s \frac{di}{dt} + i \frac{dL_s}{di} \frac{di}{dt}.$$

Bestimmt man L_s[1]) aus einer Wechselspannung

$$e = A_1 \sin(\alpha t + \varphi_1) + A_3 \sin(3\alpha t + \varphi_3) + \ldots$$

(Effektivwert E) und einem Strom J, so ist

$$L_s = \frac{E}{2\pi n J} \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{9}\frac{A_3^2}{A_1^2} + \frac{1}{25}\frac{A_5^2}{A_1^2} + \ldots}{1 + \frac{A_3^2}{A_1^2} + \frac{A_5^2}{A_1^2} + \ldots}} \quad . \quad (45)$$

Ein anderer Induktionskoëffizient, nämlich der gegenseitige, hat noch weniger Bedeutung für die elektrotechnische Praxis als L_s. Er ist, falls in einer primären Spule ein Strom i_1 fliesst und sekundär die Spannung e_2 induziert wird, definiert durch

$$e_2 = L_m \frac{di_1}{dt} = z_2 \frac{dK_2}{dt} \quad \ldots\ldots \quad (46)$$

Ist keine Streuung vorhanden und ist der primäre Selbstinduktionskoëffizient L_{s1}, der sekundäre L_{s2}, so ist $K_2 = K_1$ und

$$\frac{L_m}{L_{s1}} = \frac{z_2}{z_1} \quad \text{und} \quad \frac{L_m}{L_{s2}} = \frac{z_1}{z_2}$$

also

$$L_m^2 = L_{s1} \cdot L_{s2} \quad \ldots\ldots \quad (47)$$

$\sqrt{L_{s1} \cdot L_{s2} - L_m^2}$ ist ein Mass für die magnetische Streuung.

Ist K_1 der von der primären Spule erzeugte Flux, wovon $\frac{K_1}{\nu_1}$ die sekundäre schneidet, und sind K_2 und $\frac{K_2}{\nu_2}$ die entsprechenden sekundären Werte, so wird

$$L_m^2 = \frac{L_{s1} L_{s2}}{\nu_2 \nu_1}.$$

[1]) H. F. Weber, Wied. Ann. 1897.

Digitized by Google

Ist $l_1 = z_1 K_{s1}$ (K_{s1} primärer Streuflux), falls $L_{s1} = z_1 K_1$ (K_1 Hauptflux), so wird

$$L_m^2 = (L_{s1} - l_1)(L_{s2} - l_2).$$

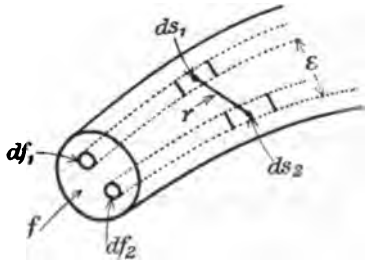
Bei Wechselströmen ist die Arbeit der Selbstinduktion im allgemeinen gleich Null, da positive und negative Arbeitsbeträge sich aufheben bezw. die E.M.K. der Selbstinduktion $L_s \frac{di}{dt}$ senkrecht zu i steht. Entsteht ein Gleichstrom J, so ist aufzuwenden [1]) eine Arbeit

$$A = -\int_0^J z \,.\, i \,.\, dK = -\int_0^J L i \, di = \frac{L J^2}{2} \quad . \quad . \quad . \quad (48)$$

Der allgemeinste Ausdruck für L_s (Selbstpotential) ist (Fig. 33)

$$L_s = \int_0^f \int_0^f \frac{df_1 \, df_2}{f^2} \int_0^s \int_0^s \frac{ds_1 \, ds_2}{r} \cos\varepsilon \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (49)$$

Fig. 33.



Ausser Beziehung (36) bis (39) ist für die Praxis (Leitungsberechnung) nur wichtig:

1. L_s von einem geradlinigen Leiter der Länge l, vom Durchmesser 2r und im Abstand d vom Boden

$$L_s = l \left[2 \log_{nat} \frac{2d}{r} + 0{,}5 \right] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (50)$$

2. L_s von zwei parallelen geradlinigen Leitern im Abstand d und von der Gesamtlänge l

$$L_s = l \left[2 \log_{nat} \frac{d}{r} + 0{,}5 \right] . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (51)$$

Schirmwirkung. Eng im Zusammenhang mit der Selbstinduktion bezw. mit deren induktiver Dämpfung steht die sogenannte

[1]) Siehe später unter Moment.

Digitized by Google

Schirm- oder Oberflächenwirkung. Man kann verschiedene Arten von Schirmwirkung unterscheiden:

1. Um einen durch Wechselstrom durchflossenen Leiter entsteht ein zirkuläres Wechselfeld, das mit dem Abstand vom Leitermittelpunkt abnimmt und deswegen die Stromlinien aus dem Innern des Leiters nach aussen drängt.

2. Umschliesst man einen Leiter in einem magnetischen Felde mit Eisen, so wird der Leiter selbst mehr oder weniger vor dem magnetischen Felde geschützt, d. h. die ihn treffende Felddichte wird reduziert.

3. Bringt man in ein Wechselfeld eine Scheibe oder eine kurzgeschlossene Spule aus leitendem Material, so entstehen darin dämpfende Ampèrewindungen, die bewirken, dass das Feld hinter der Scheibe wesentlich abgeschwächt wird.

Der letztere Fall tritt auf, wenn innerhalb einer Metallröhre ein Wechselstrom geführt wird: Ausserhalb der Röhre findet sich nur noch ein geringes zirkuläres Feld. Fliesst nämlich innerhalb der Röhre der Strom i und ist die Selbstinduktion der Röhre L_s', ihr Widerstand w, sowie der gegenseitige Induktionskoëffizient L_m, so wird in der Röhre ein Strom i' induziert, bestimmt durch

$$o = i' w' + L_s' \frac{d i'}{d t} + L_m \frac{d i}{d t} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (52)$$

Da $i' w'$ in der Regel klein ist, heben sich die beiden elektromotorischen Kräfte $L_s' i' = - L_m i$ und damit auch die entsprechenden Felder auf.

Die unter (1) erwähnte Schirmwirkung drückt sich in einer Vergrösserung des Widerstandes von Leitern gegenüber Wechselstrom aus. Der Wechselstromwiderstand w_w ist:

$$w_w = w \left[1 + \frac{\alpha^2}{12} - \frac{\alpha^4}{180} \pm \ldots \right], \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (53)$$

wobei $w = \sigma \frac{l}{q}$ der Ohmsche Widerstand für Gleichstrom und $\alpha = 2 \pi n \frac{\mu l}{w}$, l Leiterlänge und μ die Permeabilität ist.

Steinmetz berechnet als Differenz der E.M.K. an der Achse des Leiters gegenüber derjenigen an der Oberfläche den Wert

$$\sqrt{2} \pi n J . 10^{-9}$$

pro Längeneinheit. Die spezifische Reaktanz am Mittelpunkt ist

$$k = \sqrt{2} \pi^2 n . r^2 . 10^{-9}$$

Digitized by Google

(r Radius des Leiters). Falls σ der spezifische Widerstand des Leiters ist (in C.G.S.), so gibt $\frac{k}{\sqrt{k^2+\sigma^2}}$ den prozentuellen Verlust der Stromdichte, in der Mitte bezogen auf die Peripherie. Soll derselbe z. B. bei Kupfer 5 % nicht überschreiten, so muss $n r^2 \leq 36{,}6$ sein.

Für die Schirmung in Fall 2 ist das Verhältnis der Permeabilität des geschirmten und des schirmenden Körpers massgebend. Du Bois findet (E.T.Z. 1898) für das Schutzverhältnis

$$g = \frac{\text{Feldstärke des Aussenfeldes}}{\text{Feldstärke des Innenfeldes}}$$

eines langen konzentrischen Hohlcylinders aus magnetischem Material (Innenradius r, Aussenradius R, Feld senkrecht Cylinderachse)

$$g - 1 = \frac{1}{4}(\mu - 2)\left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (54)$$

Eine wichtige Rolle spielt die entmagnetisierende Wirkung der Wirbelströme in Eisenblechen (Fall 3), die von Wechselfeldern durchsetzt werden. Die Induktion an der Blechoberfläche ist wohl durch die äussere magnetomotorische Kraft hervorgerufen, im Innern jedoch ausserdem von der magnetomotorischen Kraft der Wirbelströme, die mit der Annäherung an das Zentrum zunimmt und gegen erstere phasenverschoben ist. Steinmetz entwickelt näherungsweise (nur für dünne Bleche giltig) als Maximum für die entmagnetisierenden AW pro Centimeter Länge, die auf den Mittelpunkt eines Bleches von der Dicke s wirken:

$$AW = 0{,}56\, n B s^2 . 10^{-8} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (55)$$

(n Periodenzahl, B mittlere Induktion) und für einen Draht vom Durchmesser d

$$AW = 0{,}28\, n B d^2 . 10^{-8} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (56)$$

Genauer ist die Schirmwirkung von J. J. Thomson behandelt worden: 2a sei die Blechdicke, H_{max} die durch Wirbelströme nicht beeinflusste Amplitude der magnetisierenden Kraft, mit m möge der Ausdruck

$$m = 2\pi \sqrt{\frac{\mu n}{\sigma}},$$

worin μ die Permeabilität, n die sekundliche Cykelzahl, σ den spezifischen elektrischen Widerstand des Eisens bedeutet, bezeichnet werden.

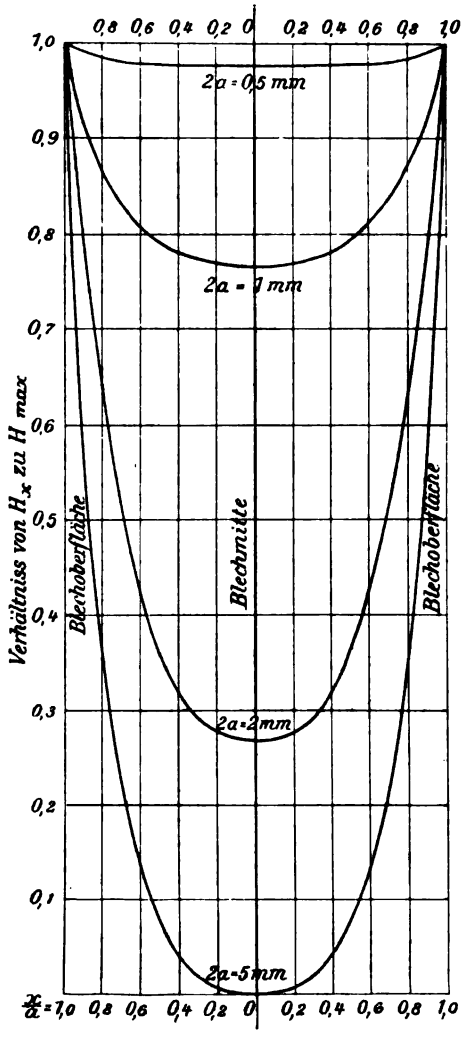
Digitized by Google

dann gilt für die Amplitude H_x im Abstande x von der Blechmitte:

$$H_x = H_{max} \left[\frac{\cos \text{hyp}\,(2\,m\,x) + \cos\,(2\,m\,x)}{\cos \text{hyp}\,(2\,m\,x) + \cos\,(2\,m\,a)} \right]^{1/2} \quad . \quad . \quad (57)$$

Die grösste Abweichung von H_x tritt ein für $\frac{x}{a} = 0$.

Fig. 34.



Aus dieser Beziehung ist in Fig. 34 bei 100 Perioden für verschiedene Blechstärken die Verteilung der magnetisierenden Kräfte über

Digitized by Google

der Blechdicke aufgezeichnet. Die Blechausnützung gegenüber nicht vorhandener Schirmwirkung, sowie das für gleichen Gesamtflux erforderliche H für 100 Perioden steht in der folgenden Tabelle:

Blechdicke mm	Raumausnützung %	Erforderliches H
0,25	99,6	1,005
0,50	93,2	1,045
1	56,4	1,78
2	25,0	4,00

Ewing fand an Hand obiger Formel, dass bei 100 Perioden jedes Blech durch ein anderes von folgender äquivalenter Dicke ohne Schirmwirkung, also bei gleichmässiger Fluxverteilung ersetzt werden kann:

Wahre Dicke mm	Aequivalente Dicke mm
0,25	0,249
0,5	0,466
1	0,564
>1	0,50

Eine einfache Beziehung für die schirmenden Gegen-AW pro Centimeter Länge ist kaum zu finden. Man kann ähnlich wie Steinmetz setzen:

$$AW_{gegen} = C \cdot n B^x s^y \cdot 10^{-8}, \quad \ldots \quad (58)$$

dann ist ungefähr bis 2 mm Dicke

$$x = 1,\ y = 2,\ C = 0,25 \text{ (Schmiedeisen)},$$

über 2 mm Dicke

$$x = 1,5,\ y = 1,\ C = 0,0011 \text{ (Schmiedeisen)},$$
$$C = 0,0006 \text{ (Guss)}.$$

Es ist vielleicht interessant, zu erwähnen, dass die schirmenden AW je nach Blechdicke und Induktion gegen 100mal so gross sein können, als die bei gleichförmiger Feldverteilung zum gleichen Flux erforderlichen Magnetisierungs-AW.

Experimentell hat neuerdings Wilson (Roy. Soc. 1901) die Schirmwirkung eines cylindrischen Stabes, in dessen Innern er Hilfs-

Digitized by Google

spulen anbrachte, ausführlich behandelt: Die Schirmung ist bei B=5000 ein Maximum (für 1 mm Draht $B_{Mitte} = {}^1/_2\ B_{Rand}$ bei 150 Perioden), bei B = 0 und B = 20000 hört die Schirmung ziemlich auf. Für denselben Verlauf des erregenden Wechselstroms verläuft die induzierte E.M.K. im Centrum ganz anders wie am Rand (beide E.M.K um mehr als 90° verschoben).

Mechanische Kräfte durch Magnetismus hervorgerufen. Die Tragkraft eines permanenten Magneten ist nach Bernoulli

$$P^{kg} = a\,G^{2/3}, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (59)$$

wenn G das Magnetgewicht in Kilogramm und a für Hufeisenform = 18 bis 24 ist.

Die Anziehung eines geschlossenen Elektromagneten ist in einer Trennungsfuge nach Maxwell:

$$P = F\left(2\pi J^2 + HJ + \frac{H^2}{8\pi}\right) = \frac{B^2}{8\pi} F, \quad \ldots \quad (60)$$

wobei F der Querschnitt der Trennungsfuge, J die Intensität der Magnetisierung $= \frac{B-H}{4\pi}$ und H die magnetisierende Kraft ist. $2\pi J^2$ ist die Anziehung der (ferro)magnetischen Materialien, HJ die Kraft zwischen Magnetisierungsspule und Ferromagnetikum und $\frac{H^2}{8\pi}$ der Zug zwischen den Spulen. Die Glieder HJ und $\frac{H^2}{8\pi}$ können unter Umständen wegfallen, wenn die Spule nicht getrennt ist oder wenn sie nicht mit dem Kern fest verbunden ist, d. h. es tritt dann an Stelle von $\frac{B^2}{8\pi} F$ der Wert $\frac{(B-H)^2}{8\pi} F$. Ist $BF = K$, so wird

$$P = \frac{K^2}{8\pi} \frac{1}{F}, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (61)$$

d. h. die Zugkraft wird mit abnehmendem Berührungsquerschnitt bei gleichem Flux grösser. Ist man allerdings nur im stande, die erregenden AW und nicht den Flux konstant zu halten, so wird der Vorteil einer geringen Berührungsfläche F teilweise wieder illusorisch. In Gramm wird

$$P = \frac{B^2 F}{8\pi \cdot 981} = \sim \left(\frac{B}{5000}\right)^2 F \quad \ldots\ldots \quad (62)$$

Im allgemeinen wird P pro Quadratcentimeter 12 bis 20 kg nicht überschreiten (16 kg bei B = 20000).

Digitized by Google

Die erforderlichen AW betragen bei eisengeschlossenem Kreis bei durchweg konstantem B

$$AW = 3951 \frac{l}{\mu} \sqrt{\frac{P}{F}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (63)$$

l ist die magnetische Weglänge, μ die Permeabilität. Für die Stossfuge und eventuelle Luftspalte sind weitere AW zuzufügen.

Obige Formeln setzen gleichmässige Verteilung der Induktion über den Querschnitt voraus. Ist dies nicht der Fall, so wird

$$P = \frac{\frac{1}{8\pi} \int_0^F B^2 \, dF}{981} \text{ stets} > \frac{\left(\frac{1}{F} \int B \, dF\right)^2 F}{8\pi \cdot 981} \quad . \quad . \quad (64)$$

Wechselstrommagnete, die entsprechend der Periodenzahl zu blättern sind, tragen bei gleichem Effektivwert des Stromes ebensoviel wie Gleichstrommagnete, aber die erforderliche Spannung ist wegen der Selbstinduktion wesentlich grösser [1]). Bei Gleichstrom ist $J = \frac{E}{w}$, bei Wechselstrom $J = \frac{E}{\sqrt{w^2 + (2\pi n L_s)^2}}$, so dass und zudem auch wegen der Raumverteilung Wechselstrommagnete grösser ausfallen als Gleichstrommagnete. Erstere zeigen jedoch bei konstanter Spannung und variablem Luftspalt zwischen Magnet und Anker weniger Variation in der Zugkraft, da die Selbstinduktion mit abnehmendem Luftspalt zunimmt; damit nehmen die magnetisierenden AW mit dem Luftabstand ab.

Elektromagnete, deren Anker in einem Minimum von Zeit angezogen werden soll, müssen kleine Selbstinduktion besitzen, da bekanntlich der Stromverlauf des erregenden Stromes dargestellt wird durch:

$$i = \frac{E}{w} \left\{ 1 - \varepsilon^{-\frac{w}{L_s} t} \right\}.$$

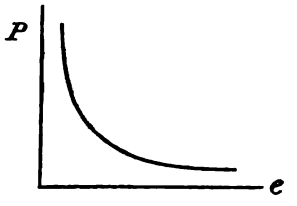
i erreicht um so früher seinen vollen Wert, je früher $\varepsilon^{-\frac{w}{L_s} t}$ Null, d. h. je grösser $\frac{w}{L_s}$ ist. Man hat also die Windungszahl (geht im Quadrat in den Wert von L_s ein) klein und den magnetischen Widerstand gross zu halten. Kleine Elektromagnete haben in der Regel

[1]) Ueberdies treten Hysteresis- und Wirbelstromverluste auf.

Digitized by Google

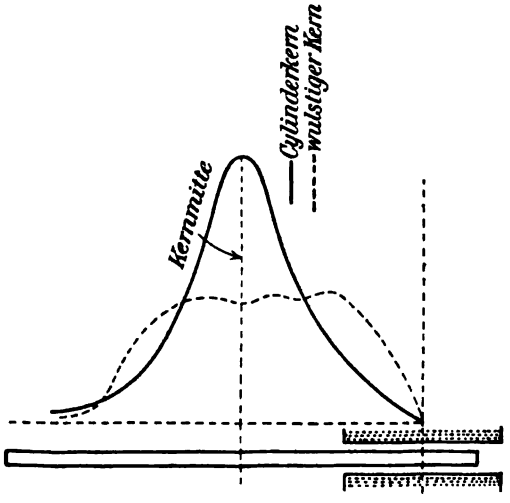
eine grössere Zeitkonstante $\frac{w}{L_s}$ als grosse. Für rasch funktionierende Elektromagnete ist es ratsam, die Wickelung hauptsächlich an den Polenden aufzubringen, den Eisenkern zur Vermeidung von hemmenden Wirbelströmen zu blättern, grossen induktionsfreien Widerstand vorzuschalten und die beweglichen Teile so leicht als angängig zu machen. Die Remanenz sollte gering sein.

Fig. 35.



Der Verlauf der Anziehungskraft P eines Elektromagneten in Abhängigkeit des Ankerabstandes e ist gemäss Fig. 35 ein derartiger, dass, falls nicht ganz besonders geartete Gegenkräfte oder entsprechend dämpfende Kräfte verwendet werden, eine springende Bewegung entsteht. Im Gegensatz hiezu verläuft die Anziehungskraft eines Solenoids auf einen Eisenkern nach Fig. 36. Das Maximum der Zugkraft ist erreicht schon lange ehe die Kernmitte innerhalb der Spule ist. Die Kräfte sind über der jeweiligen Stellung der Kernmitte aufgezeichnet und zwar

Fig. 36.



die ausgezogene Kurve für einen cylindrischen, die gestrichelte Kurve für einen wulstigen Kern. Fällt Spulen- und Kernmitte zusammen, so ist die Kraft Null. Die Anziehungskraft ist unter sonst gleichen Verhältnissen für einen runden Eisenkern vom Durchmesser d und bei der Windungszahl z proportional $i^2 z^2 \sqrt{d}$, sofern der Kern noch nicht

Digitized by Google

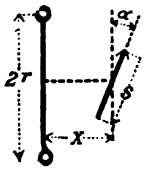
gesättigt ist. Eine Kugel aus Eisen wird von einer Windung vom Durchmesser 2r im Mittellot angezogen mit einer Kraft

$$9\,\pi\,V\,i^2\,r^4\,\frac{x}{z^8}$$

(V Kugelvolumen, i Strom, x Kugelabstand von der Windungsebene, $z = \sqrt{r^2 + x^2}$). Wird die Innenseite einer Spule mit Eisen ausgefüttert, so wird ein Eisenkern aus derselben herausgestossen.

Statt Eisen mit geringer Remanenz kann man als Solenoidkerne oder Elektromagnetanker auch Stabmagnete verwenden; solche polarisierte Mechanismen wirken in zwei Richtungen und sind wegen des bereits vorhandenen permanenten Magnetismus empfindlicher.

Fig. 37.



Die Kraftwirkung von Wechselstrommagneten ist mehr oder weniger von der Periodenzahl und der Kurvenform abhängig.

Zu Kraftäusserungen mittels Wechselstrommagneten eignet sich auch die Thomsonsche Repulsion: Bringt man in die Nähe eines Wechselfeldes eine kurzgeschlossene Spule, so werden in ihr Ströme induziert, die eine Abstossung der Spule aus dem Felde hervorrufen.

Das Grundgesetz über die Kraftwirkung eines Stromleiters dl mit dem Strom i auf einen Magneten von der Stärke m lautet:

$$dP = \frac{i\,m\,dl}{r^2}\sin\alpha = \frac{i\,\frac{K}{4\pi}\,dl}{r^2}\sin\alpha \quad . \quad . \quad . \quad (65)$$

r ist der Abstand der Magneten von dl und α der Winkel zwischen r und dl. Daraus findet sich z. B. das Moment $M = P\,.\,s$, das ein kreisförmiger Leiter vom Windungsdurchmesser 2r und von z Windungen auf eine sehr kurze Magnetnadel mit dem magnetischen Moment ms (Fig. 37) ausübt:

$$M = \frac{\pi}{5}\,\frac{i\,m\,s\,r^2}{(r^2 + x^2)^{3/2}}\cos\alpha \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (66)$$

Auf einen Leiter von der Länge l und mit dem Strom i wird in einem homogenen Feld von der Stärke B eine Kraft P ausgeübt:

$$P = l\,i\,B\sin\alpha \text{ in } CGS = 10{,}19\,l\,i\,B\sin\alpha\,.\,10^{-8} \text{ in kg}, \quad . \quad (67)$$

wobei α der Winkel zwischen l und B ist. Die Kraftrichtung steht senkrecht zur Ebene durch l und B. Für $\alpha = 90^0$ kann man zur

Digitized by Google

Bestimmung der Richtung der verschiedenen Grössen die Fingerregel S. 438 verwenden und zwar mit dem Unterschied, dass die linke statt der rechten Hand und statt e der Strom i zu verwenden ist. Auch die Lenzsche Regel (S. 439) ist zu beachten. Die freiwillige Lagenänderung eines magnetischen Systems erfolgt stets so, dass der magnetische Widerstand im Ganzen ein Minimum wird. Eine Eisenkugel vom Volumen V sucht sich in einem ungleichförmigen Feld von H_{min} zu H_{max} zu bewegen mit einer Kraft

$$\frac{8\pi}{3}\sqrt{\frac{\delta H^2}{\delta x}}$$

(x Weg).

Hysteresis. Unterwirft man eine magnetische Substanz einer cyklisch wechselnden Magnetisierung, einem magnetischen Kreisprozesse, indem man die magnetisierende Kraft alle Werte von $+H$ bis $-H$ und zurück auf $+H$ durchlaufen lässt, so bilden die successiven Werte der resultierenden Magnetisierung I bezw. der Induktion B, in Funktion der induzierenden Intensität H aufgetragen, eine Kurve, deren aufsteigender Ast vollkommen vom absteigenden verschieden ist, so dass sich als Gesamtbild eine Schleife, die sogenannte Hysteresisschleife (Fig. 4, 5 und 12), ergibt. Der Flächeninhalt dieser Schleife ist ein direktes Mass für die bei einer cyklischen Magnetisierung pro Volumeinheit des magnetisierten Körpers in Wärme umgesetzte Arbeit A_H und zwar in Erg

$$A_H = \int H\,dI$$

genommen über die ganze Fläche.

Unter Zugrundelegung der Induktion B wird die Energievergeudung pro Cyklus

$$A_H = \frac{1}{4\pi}\int H\,dB \quad \ldots\ldots\ldots \quad (68)$$

Die frühere Gleichung

$$e = iw + z\frac{dK}{dt}$$

führt ebenfalls zur Bestimmung der Hysteresisarbeit, indem

$$i = \frac{Hl}{4\pi z} \quad \text{und} \quad K = fB.$$

Also ist die Totalarbeit

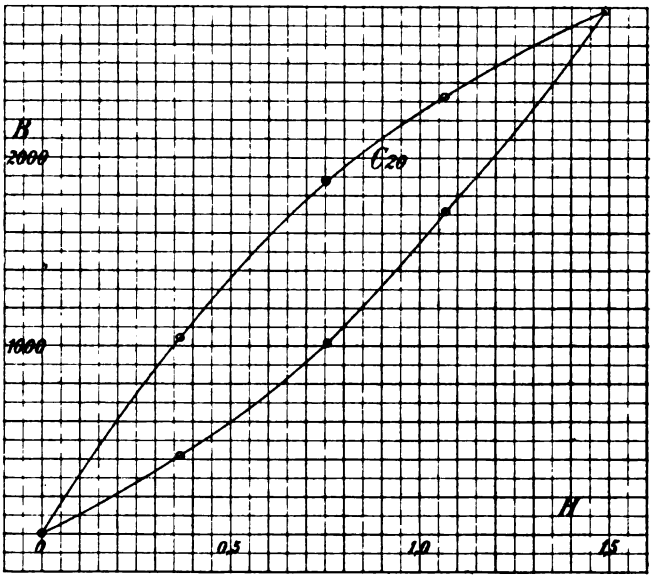
$$\int e\,i\,dt = \int i^2 w\,dt + \frac{fl}{4\pi}\int H\,dB.$$

Digitized by Google

Hievon ist $\int i^2 w\,dt$ Joulesche Wärme und $\frac{V}{4\pi}\int H\,dB$ die Hysteresisarbeit.

Da magnetische Medien in verschiedener Art und Weise magnetisiert werden können, so lässt sich auch die Erscheinung der Hysteresis verschiedentlich erzeugen und messen. Die üblichste Bestimmung der Hysteresisschleifen geschieht nach magnetostatischen Methoden, welche dadurch charakterisiert sind, dass der erregende Strom in der magnetisierenden Spule schrittweise in langsamem Tempo und in be-

Fig. 38.

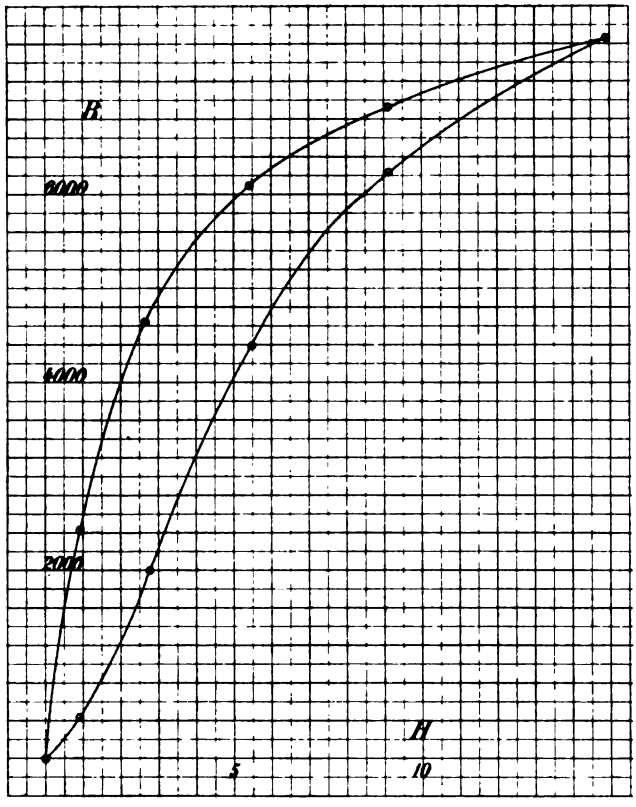


stimmter Weise geändert und jeweils die Variation der Induktion ermittelt wird, und zwar letztere entweder, wie insbesondere für ringförmige Versuchskörper, mittels eines ballistischen Galvanometers aus der in einer Hilfsspule induzierten Elektrizitätsmenge (ballistische Methode) oder, wie für Stäbe und Ellipsoide, aus der Ablenkung einer Magnetnadel (magnetometrische Methode). Zur Erzeugung beträchtlicher Hysteresiswärme eignet sich die rasche cyklische Magnetisierung durch intermittierende oder periodisch wechselnde Ströme, da der hysteretische Wärmeumsatz bei sonst gleichen Verhältnissen mit der sekundlichen Cykelzahl steigt. Die Hysteresisarbeit lässt sich in diesem Falle elektrisch mit dem Wattmeter oder kalorimetrisch messen.

Digitized by Google

Schliesslich ist es möglich, ein Versuchsstück dadurch cyklisch umzumagnetisieren, dass dasselbe in entsprechender Weise in einem konstanten Magnetfelde gedreht wird bezw. dadurch, dass man das magnetisierende Feld in geeigneter Weise um das Probestück führt (Drehfelder). In jedem Falle kann der Cyklus ein vollkommener oder ein unvollkommener sein; im ersten Falle wechselt H von einem

Fig. 39.



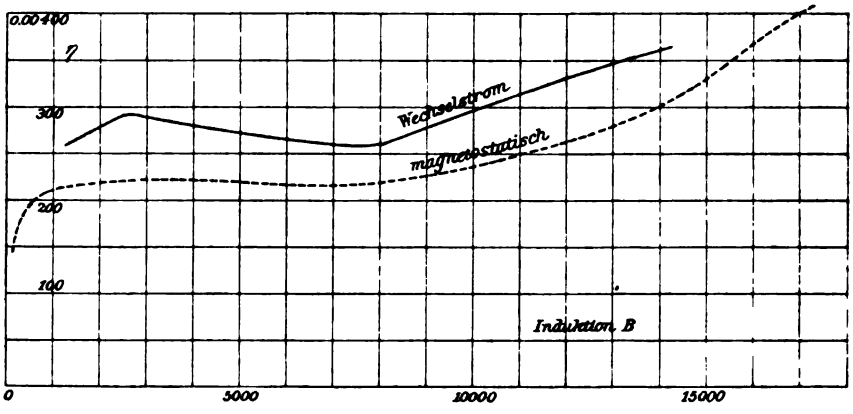
positiven Maximum (Fig. 4, 5 und 12) zu einem gleich grossen negativen Maximum, im letzten Falle ist dies nicht der Fall, in der Regel wechselt H dann nur zwischen 0 und einem Maximum. Solche Schleifen mit einem Wechsel von Null bis zu einem Maximum zeigt für Schmiedeisen Fig. 38 (für geringe magnetisierende Kräfte) und 39.

Dass die Arbeit zur Ummagnetisierung bezw. die Hysteresisarbeit je nach der eben genannten magnetischen Beanspruchungsart

Digitized by Google

eine andere ist, ist wohl sicher, wenn auch die Unterschiede experimentell noch nicht genügend festgelegt sind. Nach Versuchen des Verfassers ist in Fig. 40 für Dynamoblech der Unterschied zwischen den Arbeitsbeträgen bei Wechselstrommagnetisierung und bei magnetostatischer Beanspruchung, auf gleiche Induktion bezogen, gegeben. Der Wert $\eta = \frac{A_H}{B^{1,6}}$ ist der später erläuterten Steinmetzschen Beziehung entnommen, so dass die beiden Kurven ohne weiteres den prozentuellen Unterschied in den Arbeitsbeträgen bei den verschiedenen Induktionen ermitteln lassen. Die Wechselstrommagnetisierung ist im Minimum 15 % (B = 7600) und im Maximum 26 % grösser (B = 13000)

Fig. 40.



als die magnetostatische. Durch Strauss und Trylski ist nachgewiesen, dass die durch Hysteresis im Eisen erzeugte Wärme äquivalent der zur Ummagnetisierung erforderlichen Wechselstromarbeit ist. Max Wien[1]) hat je für zwei gleiche Maxima der magnetisierenden Kraft H die Hysteresisschleifen Fig. 41 und 42 zwischen n = 0 und n = 520 aufgenommen; er schliesst daraus:

Der Energieverlust durch Hysteresis ist — abgesehen von ganz schwachen Feldern — für gleiche Induktion bei Wechselstrom stets grösser, als die statische Hysteresisfläche ihn ergibt. Diese Erhöhung wächst mit der Schwingungszahl und ist in der Nähe der Sättigung am grössten. Hingegen ist der Energieverlust durch Hysteresis für gleiche magnetisierende Kraft in schwachen Feldern bei Wechselstrom

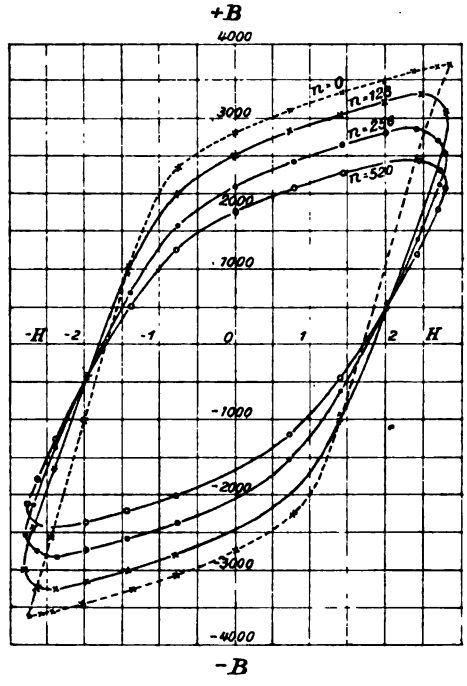
[1]) Wied. Ann. **66**, S. 859.

Digitized by Google

kleiner als bei konstanter Magnetisierung, weil die Induktion wesentlich geringer ist.

Die Beobachtungen scheinen keine andere Erklärung zuzulassen, als dass die Induktion sehr schnellen Aenderungen der magnetisierenden Kraft nicht zu folgen vermag. Die Hysteresisschleifen haben für schnelle magnetisierende Kreisprozesse eine andere Gestalt wie bei langsamen, sie werden breiter und kürzer; mit anderen Worten:

Fig. 41.



Schnellen Wechselfeldern gegenüber verhält sich das Eisen, als ob es härter wäre wie im konstanten Felde.

Legt man an eine Spule mit Eisenkern dieselbe effektive E.M.K. bei verschiedenem Kurvenverlauf derselben, so ist bei spitzem Verlauf die Hysteresis kleiner als bei sinusförmigem und bei flachem grösser. Die Unterschiede können leicht $\pm$ 10 % betragen. Dies rührt daher, dass [1]) die effektive E.M.K.

$$E = 4\,c\,n\,Z\,f\,B_{max} \cdot 10^{-8}$$

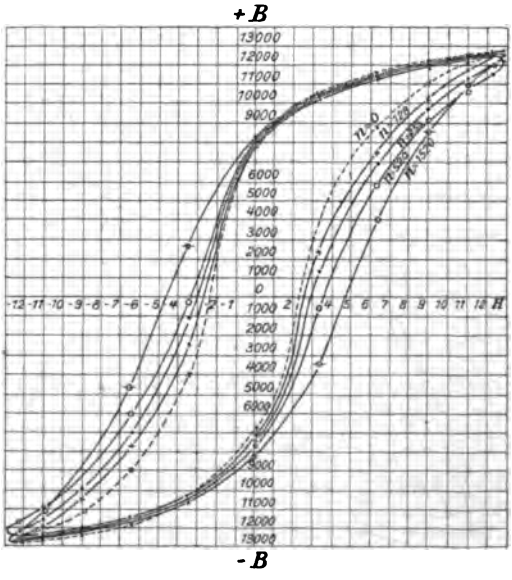
[1]) Erklärung siehe später bei Transformatoren.

Digitized by Google

ist, wobei c der Formfaktor $= \frac{\text{Maximalwert}}{\text{Effektivwert}}$ ist. Für gleiches E ist c um so grösser, je spitzer die Kurve ist, weshalb B_{max} und damit die Hysteresis mit spitzeren Kurven kleiner wird.

Sowohl der Verfasser wie Benischke[1]) fanden, dass bei Wechselstrommagnetisierung auch der Kurvenverlauf der E.M.K. bezw. der Kraftlinien nicht allein B_{max} oder die Kurvenfläche $\int e\,dt$ der E.M.K. auf die Hysteresisarbeit von Einfluss sind. Spitze Spannungskurven

Fig. 42.



geben bei gleichem B_{max} weniger Hysteresisarbeit als sinusförmige. Benischke findet für gleiches B_{max}

Scheitelfaktor	Hysteresis
1,29	199
1,414	193
1,63	186

Der Scheitelfaktor ist das Verhältnis $\frac{\text{Maximalwert}}{\text{Effektivwert}}$ der Kraft-

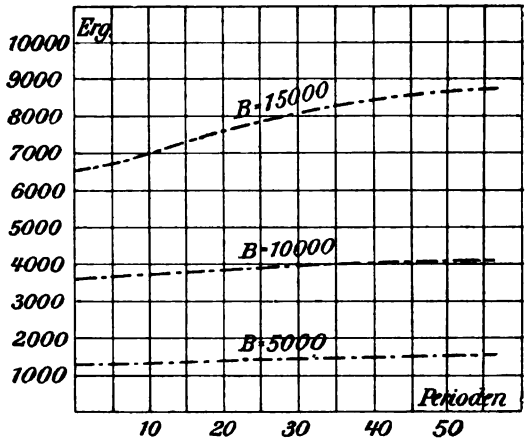
[1]) E.T.Z. 1901.

Digitized by Google

linienkurve, also je spitzer die Kraftlinienkurve, desto kleiner ist die Hysteresis [1]).

Die Hysteresisarbeit pro Cyklus ist abhängig von der Periodenzahl, ein Spezialfall dieser Abhängigkeit ist eben der Unterschied der magnetostatischen und der Wechselstrommagnetisierung.

Fig. 43.



Krogh und Rikli [2]) fanden, dass die Hysteresis nicht n, sondern

$$(A + Bn - Cn^2)n$$

proportional ist. Dabei betragen die Konstanten beispielsweise für $B = 15\,000$

$$0{,}00136 + 15 \cdot 10^{-6} n - 10 \cdot 10^{-8} n^2,$$

für $B = 10\,000$

$$0{,}00144 + 6{,}1 \cdot 10^{-6} n - 5{,}2 \cdot 10^{-8} n^2,$$

für $B = 5000$

$$0{,}00151 + 4{,}3 \cdot 10^{-6} n - 1{,}0 \cdot 10^{-8} n^2.$$

Steinmetz fand seinerzeit

$$0{,}0017 + 16 \cdot 10^{-6} n - 3 \cdot 10^{-8} n^2.$$

Die Hysteresisverluste selbst sind in Fig. 43 in Abhängigkeit von n gezeichnet. Bei $B = 5000$ ist die Hysteresis für 50 Perioden

[1]) Beaton, Taylor und Barr fanden allerdings (Electrician 1896), dass kein Einfluss der Kurvenform existiere, ebenso Rössler, E.T.Z. 1895.

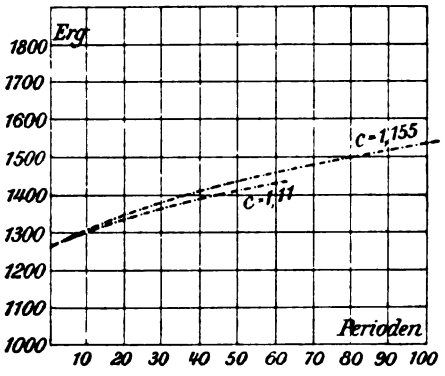
[2]) E.T.Z. 1900.

Digitized by Google

10 % grösser als bei n = 0 und bei B = 15000 ist der Unterschied 30 %. In Fig. 44 sind weitere Schaukurven für die beiden Formfaktoren 1,155 und 1,11 der Spannungskurve und konstantes B gegeben. Klemencic hat den Energieverbrauch noch bei Polwechselzahlen von mehreren Tausend aufgenommen und ebenfalls eine Zunahme konstatiert, die um so grösser ist, je kleiner die Koercitivkraft ist.

Wählt man bei magnetostatischen Aufnahmen der Hysteresisschleifen die Sprünge verschieden gross, so lässt sich bei weichem Material[1]) nach Fig. 45 mit der Zunahme der Grösse der Sprünge eine Abnahme der Energievergeudung konstatieren und zwar bis 16 %.

Fig. 44.



Wird nur von H = 0 bis + H_{max} ummagnetisiert, so wird je auf die halbe Differenz, zwischen den äussersten Induktionswerten bezogen, die Hysteresis viel grösser als bei voller cyklischer Magnetisierung zwischen $\pm H_{max}$, und zwar können die Beträge das 2- bis 3fache werden.

Die Hysteresis pro Cyklus nimmt bei linearer Magnetisierung mit der Induktion zu, bis bei B = ∞ 20000 nach Baily (Fig. 46) ungefähr Konstanz eintritt. Bei drehender Magnetisierung ist der Verlauf jedoch ein wesentlich anderer: Fig. 47 nach Beattie und Clinker; von B = ∞ 15000 an nimmt die Hysteresis pro Cyklus wieder ab und fällt bei B = ∞ 25000 nahezu auf Null. Nach neueren Versuchen von Beattie liegt das Maximum der drehenden Hysteresis pro Kubikcentimeter und Cyklus folgendermassen $\left(J = \frac{B-H}{4\pi}\right)$:

[1]) Gumlich und Schmidt, E.T.Z. 1900.

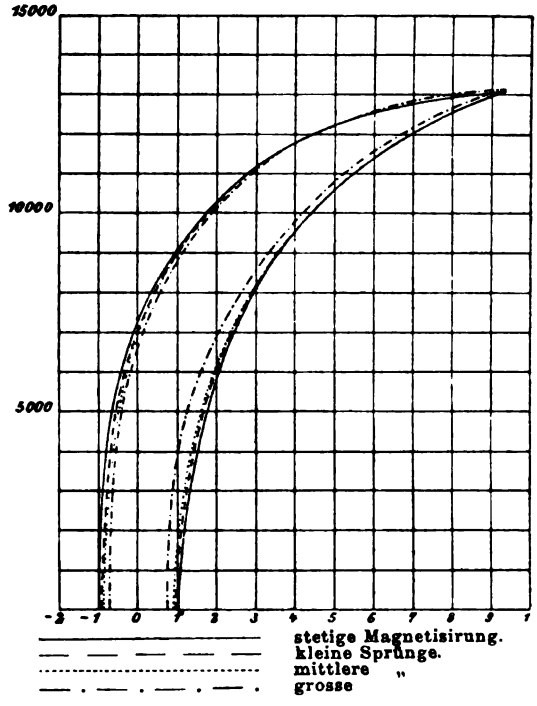
Digitized by Google

für Ni	bei J =	350	C.G.S., nämlich	10 000	Erg.
„ Co	„ J =	700	„ „	36 000	„
„ Weicheisen	„ J =	1350	„ „	14 000	„

Sie verschwindet beinahe ganz bei J = 500 (Ni), = 1000 (Co) und = 1700 (Fe).

Ueber den Vergleich zwischen linearer und drehender Hysteresis liegt noch wenig zuverlässiges Material vor. Da bei drehender Magneti-

Fig. 45.



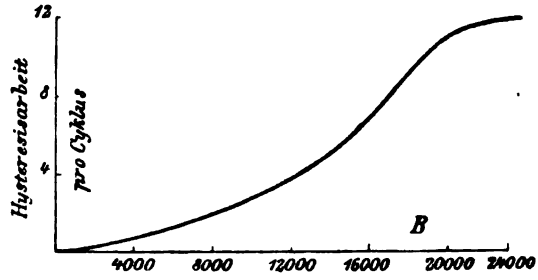
sierung das Eisen in verschiedener Richtung von den Kraftlinien durchsetzt wird, so zerlegt man wohl (?) an jeder Stelle des Eisenkörpers die dort auftretenden Felder in zwei Komponenten, bei einem Cylinder z. B. in eine radiale und eine tangentielle (Fig. 48) und ermittelt für das Maximum beider Komponenten die Hysteresis ebenso, wie wenn es sich um lineare Magnetisierung handelt. Dabei kommt man, je nach den Abmessungen bezw. dem Verhältnis $\frac{\text{Polbogen}}{\text{Eisentiefe}}$, auf 20 bis 100 % grössere Werte als bei Wechselstrommagnetisierung. Ob dies

Digitized by Google

richtig ist, kann noch keineswegs als erwiesen gelten. Dina[1]) gibt an, dass bis B = 10000 die drehende Hysteresis etwas grösser ist als die statische, aber dann bei B = 18000 um ca. 9 % kleiner wird.

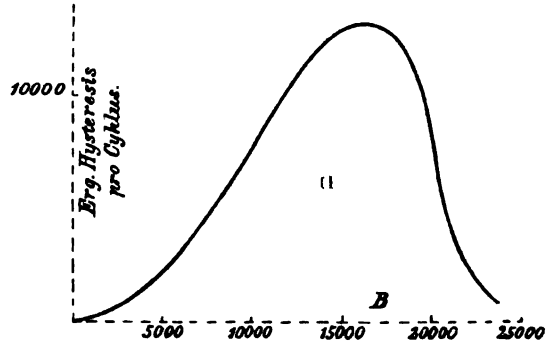
Erschütterungen verringern besonders bei schwachen Feldern und weichem Material die Hysteresis wesentlich. Die chemische Zusammen-

Fig. 46.



setzung ist selbstverständlich von Einfluss auf die Grösse der Hysteresis, aber ihr Einfluss ist nicht gesetzmässig festzulegen. C und Mn vergrössern in der Regel die Energievergeudung. Chemisch reines Eisen hat nach E. Wilson in gewöhnlichem und in ausgeglühtem Zustand wesentlich grössere Hysteresisverluste als gutes Transformatorenblech.

Fig. 47.



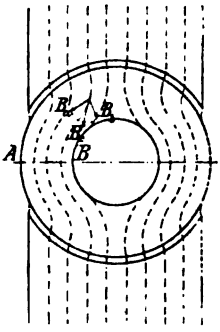
Mit steigender Temperatur nimmt die Hysteresis etwas ab und zwar für Schmiedeisen bei B = 3000 bis 14000 und 10° Temperaturdifferenz um ½ bis 1 %. Auf gleiche Induktion bezogen findet Thiessen bei − 70, + 20 und + 100° C., dass für Schmiedeisen die Verluste bei − 70° stets grösser sind als bei + 20° und + 100°. Für B = 2000

[1]) Elettricittà 1900, 29. Mai.

Digitized by Google

und 10000 sind dieselben bei 100° kleiner als bei 20°, für B = 5000 ist der Hysteresisverlust bei 20° weitaus der kleinste. Bei einer Induktion von annähernd 15000 nimmt sowohl für Nickel- als Werkzeugstahl der Verlust mit abnehmender Temperatur zu. Bei Temperaturen über 200° fällt die Hysteresis stärker ab und hat bei 700° nur noch einen geringen Betrag. Richardson und Lownd finden für 3 bis 10%iges Aluminium-Eisen: Der Hysteresisverlust nimmt zunächst bei konstantem H_{max} mit der Temperatur ab, dann folgt eine Zunahme mit dem Maximum bei 550° C., welche Temperatur um ca. 80° höher als diejenige für die maximale Induktion liegt. Nun fällt der Verlust rasch ab und ist bei 700° C. verschwindend. Ausglühen verringert die Hysteresis, Druck vergrössert sie. Dauerndes Erwärmen auf über 70 bis 100° C. verschlechtert das Eisen mit der Zeit mehr und mehr und zwar nennt man diese Erscheinung „Altern" (Aging). Gutes Eisen ist gerade dem Altern am meisten ausgesetzt.

Fig. 48.



Roget[1]) fand, dass bis zu 40° C. auch nach beliebig langer Zeit eine Veränderung bei keiner Blechsorte eintritt, dass aber bei höherer Temperatur der Eisenverlust mit der Zeit anwächst. Die Versuche wurden über einen Zeitraum von 25 Tagen ausgedehnt. Die Vermehrung der Verluste wächst bis zu etwa 180° C. mit der Temperatur und wird für höhere Temperaturen wieder kleiner. Bei 135° C. betrug nach 15 Tagen der Hysteresisverlust das 2,4fache des ursprünglichen Wertes, stieg aber in den folgenden Tagen nicht weiter. Bei 160° C. nahm die Hysteresis innerhalb 5 Tagen um 200% zu, um dann wieder abzunehmen. In seiner letzten Arbeit hat Roget die Erwärmung bis zu 700° C. gesteigert. Bei dieser Temperatur ist eine Erhöhung des Hysteresisverlustes nicht mehr zu bemerken; dagegen ist sie bei 300° C. etwa 70%. Zu bemerken ist, dass gutes schwedisches Blech in Bezug auf Vermehrung des Verlustes sich nicht so günstig zeigte, als eine käufliche Sorte von Transformatorenblech. Bei 120° C. zeigte dieses Blech in 15 Tagen beinahe keinen Zuwachs des Verlustes, während beim schwedischen Blech in derselben Zeit der Zuwachs über 100% betrug. Roget fasst die Ergebnisse seiner Untersuchung wie folgt zusammen:

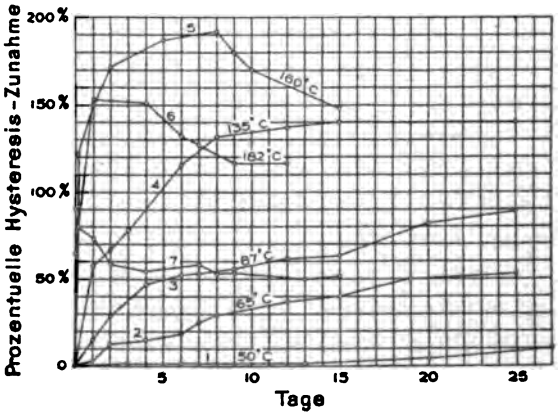
[1]) Electrician u. E.T.Z. 1899.

Digitized by Google

1. hartes Material ändert sich weniger als angelassenes;
2. alle Aenderungen verschwinden nach wiederholtem Anlassen;
3. die Aenderungen treten ein, gleichviel ob die Erhitzung ohne oder mit Unterbrechungen stattfindet und lassen sich nicht durch anhaltendes Erhitzen auf hohe Temperatur vermeiden;
4. die Aenderungen können aufgefasst werden als zwei sich überlagernde Erscheinungen; die eine bewirkt eine Vermehrung des Hysteresisverlustes und überwiegt bei mässiger Temperatur, die andere wirkt wie ein unvollkommenes Anlassen und überwiegt bei hoher Temperatur;
5. die Neigung des Materials, bei mässiger Temperatur schlechter zu werden, verschwindet nicht durch langdauernde Erwärmung auf hohe Temperatur;
6. die Aenderungen betreffen nur den unteren Teil der Magnetisierungskurve; bei annähernder magnetischer Sättigung sind sie nicht bemerkbar;
7. die Aenderungen treten ein, gleichviel ob die Luft zu den Blechen Zutritt hat oder nicht.

Die Kurven Fig. 49 und 50 rühren ebenfalls von Roget her. Sie entsprechen der Zunahme der Hysteresis in Prozenten bei Erwärmung auf die angeschriebenen Temperaturen für B = 4000. Zwischen

Fig. 49.



40° und 135° nimmt[1]) die Hysteresis einfach mit der Zeit, während der das Versuchsstück vorher erhitzt wurde, zu. Von 135° ab zeigt sich, dass in verhältnismässig kurzer Zeit ein Maximum der Hysteresis

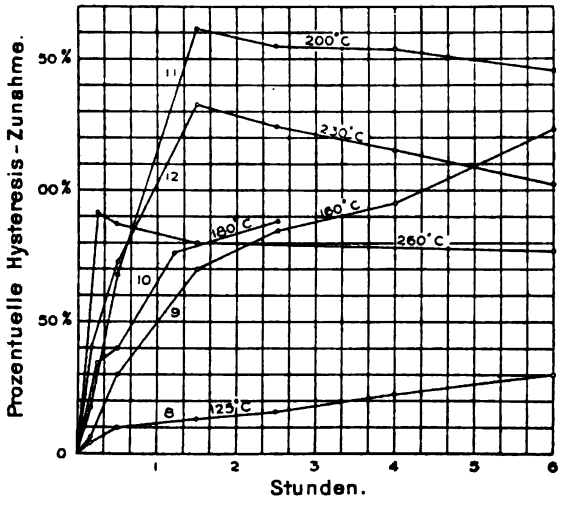
[1]) J. Dewar, Roy. Soc. 68.

Digitized by Google

erreicht wird, nach welcher weiteres Erhitzen eine ausgesprochene Abnahme der Magnetisierungsarbeit hervorruft. Der grösste Wert der Hysteresiszunahme wird bei 180° erreicht, von da ab aufwärts fällt die Aenderung der Hysteresis durch Erhitzen wieder wesentlich geringer aus. Der jeder Temperatur entsprechende Höchstwert der Hysteresis tritt um so früher ein, je höher die Temperatur. Bei andauernder Erwärmung auf ca. 80° können Handelseisenbleche anfangs eine Zunahme von 4 bis 5 % pro Tag und total 50 und mehr Prozent zeigen.

Nach Mordey ist das Altern grösser, wenn während des Erhitzens Druck auf die Bleche ausgeübt wird. Die erhöhten Verluste

Fig. 50.



reduzieren sich beim unbenützten Liegen bei gewöhnlicher Temperatur nicht. Die Kurven Fig. 51 sind von A. H. Ford[1]) an vier verschiedenen Transformatoren von 1 bis 2 Kilowatt gemessen, welche die angegebene Zeit vollbelastet waren. Die Eigenschaft des Alterns ist jedenfalls weniger von der chemischen Zusammensetzung als von der physikalischen Struktur, der Temperatur und der mechanischen Behandlung abhängig. Die Höhe der Temperatur des Ausglühens und die Zeitdauer hiefür, sowie der zeitliche Verlauf derselben ist von äusserster Wichtigkeit; Abschrecken von Rotglut aus soll z. B. nach Ford das Altern reduzieren.

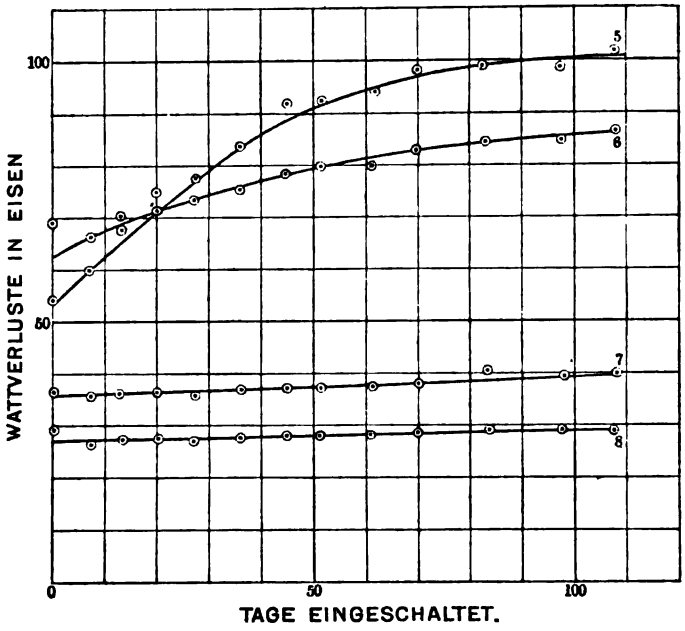
Die Hysteresis bedingt in Wechselstromapparaten eine Verzerrung der Stromkurve gegenüber der Spannungskurve, wie dies aus den

[1]) Am. Inst. El. Eng. 1900.

Digitized by Google

Kurven Fig. 31 und 52 bis 54 hervorgeht; diese Stromkurven entsprechen der Spannung Fig. 55 bei den verschiedenen angeschriebenen Induktionen in einem eisengeschlossenen Kreis. Die Verzerrung erklärt

Fig. 51.



sich leicht aus der B-H-Hysteresisschleife: Gegeben ist die E.M.K.-Kurve $e = c \frac{dB}{dt}$, woraus punktweise $B = c \int e\,dt$. Zu den einzelnen Werten von B entnimmt man aus der Schleife die unregelmässig verlaufenden Werte von H, die dem Strom i proportional sind.

Ein einfaches genaues Gesetz, das die Hysteresisarbeit mit der aufgewandten maximalen magnetisierenden Kraft oder der maximalen Induktion verknüpft, gibt es nicht. Für gewisse praktische Fälle genügend genau ist allerdings die Steinmetzsche Beziehung

$$A_H = \eta \cdot n \cdot B_{max}^{1,6} \cdot V \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (69)$$

oder

$$A_H = \eta \cdot n \left(\frac{B_{max} - B_{min}}{2}\right)^{1,6} V \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (70)$$

(n Periodenzahl, V Volumen in Kubikcentimetern, η Konstante.)

Digitized by Google

Die erstere Gleichung ist für volle Ummagnetisierung $\pm B_{max}$ bestimmt. Für Schmiedeisen und lineare Magnetisierung ist η meist zwischen $B_{max} = 1000$ und 10000 innerhalb weniger Prozente konstant (siehe Fig. 40). Bei kleineren Werten als 1000 wird η wesentlich kleiner und über 10000 wesentlich grösser und erreicht bei 16000 bis

Fig. 52.

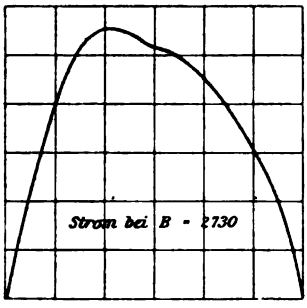
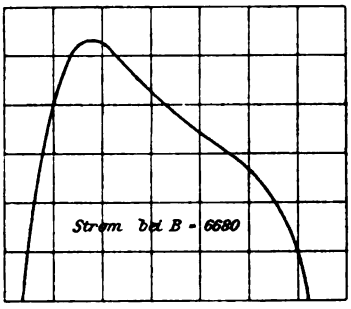


Fig. 53.



20000 ungefähr einen konstanten Wert. Bezieht man allerdings η auf $J^{1,6} = \left(\frac{B-H}{4\pi}\right)^{1,6}$, was an sich richtiger ist, so ist ein Konstantwerden bei hohen Werten von J nicht zu bemerken.

Für Magnetisierungen zwischen $H = 0$ und H_{max} ist nach Versuchen von Steinmetz η auch annähernd konstant, nach Versuchen

Fig. 54.

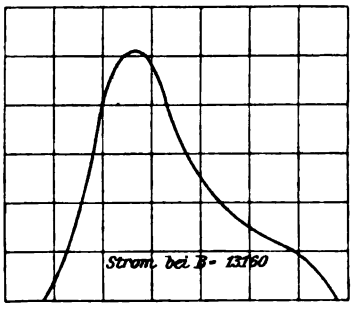
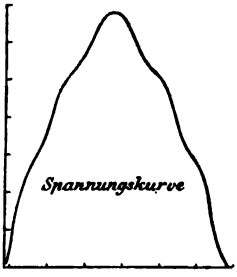


Fig. 55.



des Verfassers ist das jedoch gar nicht der Fall: Für $H_{max} = 27$ ist z. B. η mehr als 3mal so gross als für $H_{max} = 2$. Auch für drehende Hysteresis lassen sich offenbar ähnlich grosse Abweichungen finden.

Statt des Exponenten 1,6 wurden von verschiedenen Beobachtern für einzelne Gebiete als richtiger Werte gefunden, die zwischen 1,4 und 1,7 liegen. Bei kleinem H ist statt 1,6 sogar 3 zu setzen.

Digitized by Google

Legierungen von Eisen zeigen Koëffizienten bis 2,2. Obiger Wert von η schwankt für gebräuchliches Schmiedeisen zwischen 0,001 und 0,004, bei Gusseisen bis 0,03, bei Stahl bis 0,1. Auf das Kilogramm bezogen kann man nach Kapp für gutes Schmiedeisen setzen in Watt pro Kilogramm

$$A_H = 0{,}12 \frac{n}{100} \left(\frac{B}{1000}\right)^{1{,}6} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (71)$$

Steinmetz behandelt in Alternating Current Phenomena die Wechselstromhysteresis unter dem Gesichtspunkt, dass bei einer effektiven E.M.K. E zur Ueberwindung der Hysteresis ein Strom J fliessen muss, der ersterer um den Winkel $(90 - \alpha)$ nacheilt, also

$$A_H = J E \sin \alpha \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (72)$$

Zwischen dem magnetisierenden Strom J und dem Magnetismus existiert dabei der hysteretische Voreilungswinkel α. Unter Benützung der Beziehung (69) findet Steinmetz

$$\sin \alpha = \frac{4 \mu \eta}{B_{max}^{0.4}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (73)$$

(μ Permeabilität.) Der $\sphericalangle \alpha$ ist nach Lyle beispielsweise für $B = 4000$ ca. 38°, für $B = 12000$ ca. 19°. Für Kreise mit nichtmagnetischen Gliedern wird er wesentlich kleiner.

Die Fläche $\int H \, dB$ lässt sich mit einiger Annäherung als 4faches Produkt aus B_{max} und Koercitivkraft H_k darstellen, so dass die Hysteresisarbeit $\frac{1}{\pi} H_k \cdot B_{max}$ wird. Zwischen $B_{max} = 4500$ bis gegen 18000 erhält man daraus ganz annehmbare Resultate. Versuche ergaben folgende prozentuelle Fehler (+ zu grosse Werte):

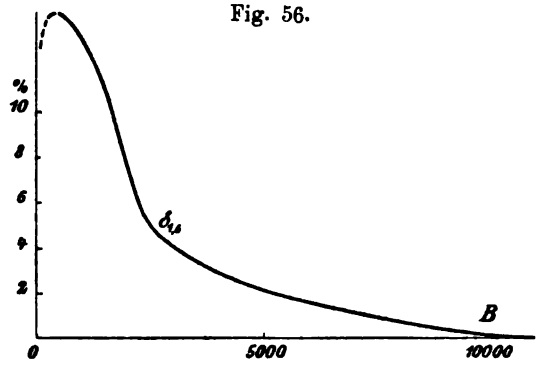
B_{max}	%
160	+ 50
2 700	+ 22
6 800	+ 8
10 200	− 2
14 100	− 18
15 800	− 23
17 200	− 10

Bei Bestimmung der Hysteresisverluste in Körpern, deren magnetische Weglänge an verschiedenen Querschnittsstellen variiert, ist der

Digitized by Google

ungleichförmigen Induktionsverteilung über den Querschnitt Rechnung zu tragen. Nimmt man einfach eine mittlere Induktion an, so erhält man in der Regel zu kleine Hysteresisbeträge. In Fig. 56 ist der prozentuelle Fehler für verschiedene Induktionen eines Eisenrings von

Fig. 56.



Dimensionen, wie sie für kleinere Gleichstrommaschinen üblich sind, aufgezeichnet. Genau hat man so zu verfahren, dass man die Hysteresisbeträge über den Querschnitt integriert, also unter Verwendung der Steinmetzschen Formel z. B. bildet

$$\frac{1}{F} \cdot \eta \cdot n \cdot V \int_0^F B^{1,6}\, df,$$

was stets grösser als

$$\eta \cdot n\, V\, B_{mitt.}^{1,6}$$

ist (F Querschnitt, df Querschnittselement).

In Eisenkernen innerhalb erregender Spulen ist die Induktion in der Spulenmitte am grössten; sie nimmt mit der Entfernung von der Spulenmitte ab. Für die Hysteresis ist natürlich massgebend

$$\eta \int_0^l F B^{1,6}\, dl$$

(l Eisenlänge, F Eisenquerschnitt). Die äquivalente Induktion B_x, welche bei gleichförmiger Verteilung dieselben Hysteresisverluste ergäbe, d. h.

$$\eta\, B_x^{1,6}\, l\, F = \eta \int_0^l F\, B^{1,6}\, dl,$$

tritt nach Flemming und Gill an einer Stelle auf, die 0,56 der halben Kernlänge aus der Mitte liegt.

Digitized by Google

Die auf S. 444 besprochene Schirmwirkung hat natürlich auch auf die Hysteresis bei Wechselstrommagnetisierung einen erheblichen Einfluss. Bei gleichem Gesamtflux und 100 Perioden sind z. B. nach Ewing die Hysteresisverluste:

mm Blechdicke	Watt Hysteresis
0,25	107
0,5	110
1	138
2	206

Die Hysteresis in Blechtafeln von Handelswalzeisen ist von Stelle zu Stelle sehr verschieden. Nach G. Stern schwankte z. B. der Hysteresiskoëffizient an verschiedenen Stellen um maximal 28 %. Am schlechtesten sind die Randproben senkrecht zur Walzrichtung, am besten die Innenproben parallel zur Walzrichtung.

Wirbelströme. Neben der Hysteresis sind bei der Ummagnetisierung von Eisen die Wirbelstromverluste von Bedeutung. In Metallteilen werden durch Wechselfelder bezw. bei jeder Feldänderung gerade wie in einer Sekundärspule elektromotorische Kräfte E induziert (Windungszahl $z = 1$):

$$E = 4\,c\,n\,B_{max}\,F\,.\,10^{-8}.$$

Die elektromotorischen Kräfte erzeugen Ströme

$$J = \frac{E}{\sqrt{w^2 + (2\pi n L)^2}} = \frac{E}{w \cos \varphi},$$

wobei $\varphi = \sphericalangle (E\,J)$.

Die Wirbelstromarbeit wird

$$A_w = \frac{E^2}{w^2 + (2\pi n L)^2}\,w = \frac{E^2}{w \cos^2 \varphi}\Big|_{L=0} = \frac{E^2}{w}$$

$$= \varepsilon\,V\,(c\,n\,B_{max})^2 = \beta\,n^2\,B_{max}{}^2\,.\,V, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (74)$$

worin ε und β eine Konstante, V das Volumen, c der Formfaktor der Spannungskurve und n die Periodenzahl ist. β ist theoretisch [1]) in C.G.S. für Blech von der Dicke s:

$$\beta = 1{,}645\,.\,\frac{1}{\sigma}\,.\,s^2\,.\,10^{-9}\Big|_{Fe} = 1{,}645\,s^2\,.\,10^{-4} \quad . \quad . \quad (75)$$

[1]) Steinmetz.

Digitized by Google

$\left(\frac{1}{\sigma} = 10^{-5}$ das Leitvermögen des Eisens$\right)$, für Draht vom Durchmesser d:

$$\beta = 0{,}617\ d^2 \frac{1}{\sigma} \cdot 10^{-9} \Big|_{Fe} = 0,\ 617\ d^2 \cdot 10^{-4} \quad . \quad . \quad (76)$$

Nach Kapp kann man für Eisen pro Kilogramm in Watt setzen (s in Millimeter):

$$A_w = 0{,}19 \left(s \frac{n}{100} \frac{B}{1000}\right)^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (77)$$

Nach obiger Entwicklung ist A_w vom Formfaktor der Spannungskurve abhängig, Benischke[1]) fand dagegen, dass z. B.

$$\beta = 15{,}2\ s^2 \sigma_e (1 - \alpha t) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (78)$$

ist, worin s die Blechdicke, $\sigma_e = \frac{\text{Maximalwert}}{\text{Effektivwert}}$, der Scheitelfaktor der Spannungskurve, t die Temperatur und $\alpha = 0{,}0005$ der Temperaturkoëffizient des Eisens ist. Bezüglich der Berücksichtigung der Kurvenform von B scheint es allerdings das Richtigste, die B-Kurve in ihre Sinusschwingungen mit den Maxima B_1, B_2, B_3 . . . zu zerlegen, dann ist

$$A_w = V \cdot \beta\ [(n_1 B_1)^2 + (2 n_1 B_2)^2 + (3 n_1 B_3)^2 + \ldots].$$

Die Abnahme der Wirbelstromverluste mit der Temperatur beträgt etwa 5 % bei 10 ° C.

Da der spezifische Widerstand σ die Wirbelstromverluste direkt verkleinert, sei folgendes bemerkt:

Material	σ (Mittelwert)
Schmiedeisen . . .	$1 \cdot 10^{-5}$
Stahlguss	$1 \cdot 10^{-5}$
Gusseisen	$2 \cdot 10^{-4}$

Kohle, Si und Mn vergrössern σ.

In obigem ist durchweg die Selbstinduktion des Eisens vernachlässigt, was in allen Fällen, wo es auf die Phasenverhältnisse ankommt, und überhaupt bei allen genauen Rechnungen nicht zulässig ist.

[1]) E.T.Z. 1901.

Digitized by Google

Da die Wirbelströme die direkte Ursache der Schirmwirkung sind, so werden die Wirbelstromverluste durch letztere Erscheinung wesentlich beeinflusst. Nach Ewing ist bei gleichem Flux und 100 Perioden:

mm Blechdicke	Wirbelstrom-verluste
0,25	17
0,5	66
1	241
2	569

Ein weitergehender Vergleich ist aus nachstehender Tabelle zu ziehen, die für einen eisengeschlossenen Transformator bei 50 Perioden gilt:

B_{mittel}	Blechdicke mm	Aufgewendete AW	Wattverlust total	cos φ [1])
4000 (Gleicher Flux)	0,5	97	30	0,58
	2	177	57	0,57
	5	340	145	0,75
	20	1260	640	0,73
11 000 (Gleicher Flux)	0,5	225	152	0,48
	2	445	390	0,63
	5	1100	1150	0,74
	20	5400	4800	0,64

Eine einfache Formel ist schwer aufzustellen. Angenähert gilt für stärkere Bleche: Die Gesamteisenverluste sind

$$A^{Watt} = C \cdot s \, [(B_{max})_{mitt}]^x \, n^2 \cdot G^{kg},$$

$$x = \sim 2{,}2, \; C = \sim 4{,}5 \cdot 10^{-10},$$

s geht also nicht im Quadrat, sondern einfach ein. $(B_{max})_{mitt}$ bedeutet die mittlere Maximalinduktion über dem Querschnitt, d. h. $\frac{\text{Gesamtflux}}{\text{Querschnitt}}$.

Für konstante erregende AW erhielt man folgende Resultate am selben Versuchstransformator:

[1]) Der cos φ wird bei ungefähr 10 mm Wandstärke ein Maximum = 0,80 für B = 10 000.

Digitized by Google

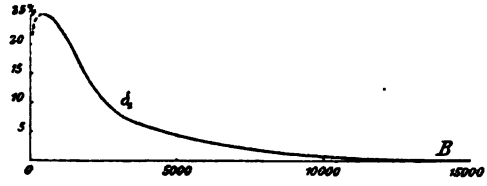
Erregende AW	Blechstärke mm	Watt Totalverlust
270	0,5	191
	1,0	217
	2	155
	5	88
	10	60
	20	40
3600	0,5	550
	10	4500
	20	2300
	80	1600

Townsend[1]) hat neuerdings durch Versuche nachgewiesen, dass die Wirbelströme nicht B^2, sondern $B^{1,6}$ proportional sind, dass also

$$A_{H+W} = B^{1,6} (\eta n + \beta n^2) V.$$

Ist die Verteilung des Fluxes über den Querschnitt keine gleich-

Fig. 57.



mässige und ist B_m die mittlere Induktion, so ist die Wirbelstromarbeit nicht B_m^2, sondern $\frac{\int B^2 df}{F}$ proportional. Für einen Dynamoring üblicher Abmessungen ist in Fig. 57 für verschiedene Induktionen der Fehler verzeichnet, wenn man mit B_m^2 rechnet.

Auf eine Vernachlässigung bei den magnetischen Berechnungen hat H. Kamps in E.T.Z. 1901 hingewiesen, nämlich auf den Einfluss der Oxydschichten von Eisenblechen. Bezeichnet

d den mittleren Wert der Stärke des einseitigen Zunderbelags,
F den vollen Blechquerschnitt,
x die Anzahl der zu einer Probe gehörigen Blechstreifen,
b die Breite eines einzelnen Blechstreifens,

[1]) Inst. Am. El. Eng. 1900.

Digitized by Google

B die ohne Berücksichtigung des Zunders gefundene Induktion,
$\mathfrak{B}'$ die Induktion nach der Beize, welche mindestens auf die völlige Beseitigung des Zunders sich erstrecken muss, dann aber an beliebigem Punkte beendet werden darf,
$\mathfrak{B}_z$ die Induktion des Zunders,
so wird d gegeben durch die Formel

$$d = \frac{F}{2\,b\,x}\left\{1 - \frac{B}{\mathfrak{B}' + \frac{\mathfrak{B}_z\,(\mathfrak{B}' - B)}{B}}\right\}.$$

Alle drei Induktionen müssen sich auf die gleiche Feldstärke beziehen.

Das Verhältnis $\frac{\text{beiderseitige Zunderstärke}}{\text{totale Blechstärke } \delta}$ wurde an Dynamoblechen zu 0,07 bis 0,16 gefunden. Der prozentuelle Fehler durch Zunder beträgt:

bei der Induktion $\pm\frac{2\,d}{\delta}$,

bei der Permeabilität $\pm\frac{2\,d}{\delta}$,

bei dem Hysteresisverluste
$\pm\frac{2\,d}{\delta}$ bei Bezug auf unveränderte Feldstärke,
$\mp\left[\left(\frac{\delta}{\delta - 2\,d}\right)^{0{,}6} - 1\right]$ bei Bezug auf unveränderte Induktion,

bei dem Steinmetzschen Koëffizienten
$\mp\left[\left(\frac{\delta}{\delta - 2\,d}\right)^{0{,}6} - 1\right]$ bei Bezug auf unveränderte Feldstärke,
$\pm\frac{2\,d}{\delta}$ bei Bezug auf unveränderte Induktion.

Hiebei gilt das obere Vorzeichen der algebraischen Ausdrücke dann, wenn die Probe völlig mit Zunder bedeckt, das Eisenmaterial hingegen völlig oxydfrei ist; das untere Vorzeichen gilt für den umgekehrten Fall.

Vorstehend habe ich die theoretischen Grundlagen gegeben, die

Digitized by Google

ich in einem späteren Aufsatz auf die praktisch wichtigsten Fälle in ausführlicher Weise anzuwenden beabsichtige.

Nachtrag zu S. 448 (Schirmwirkung nach E. Wilson für einen 1 mm Eisendraht):

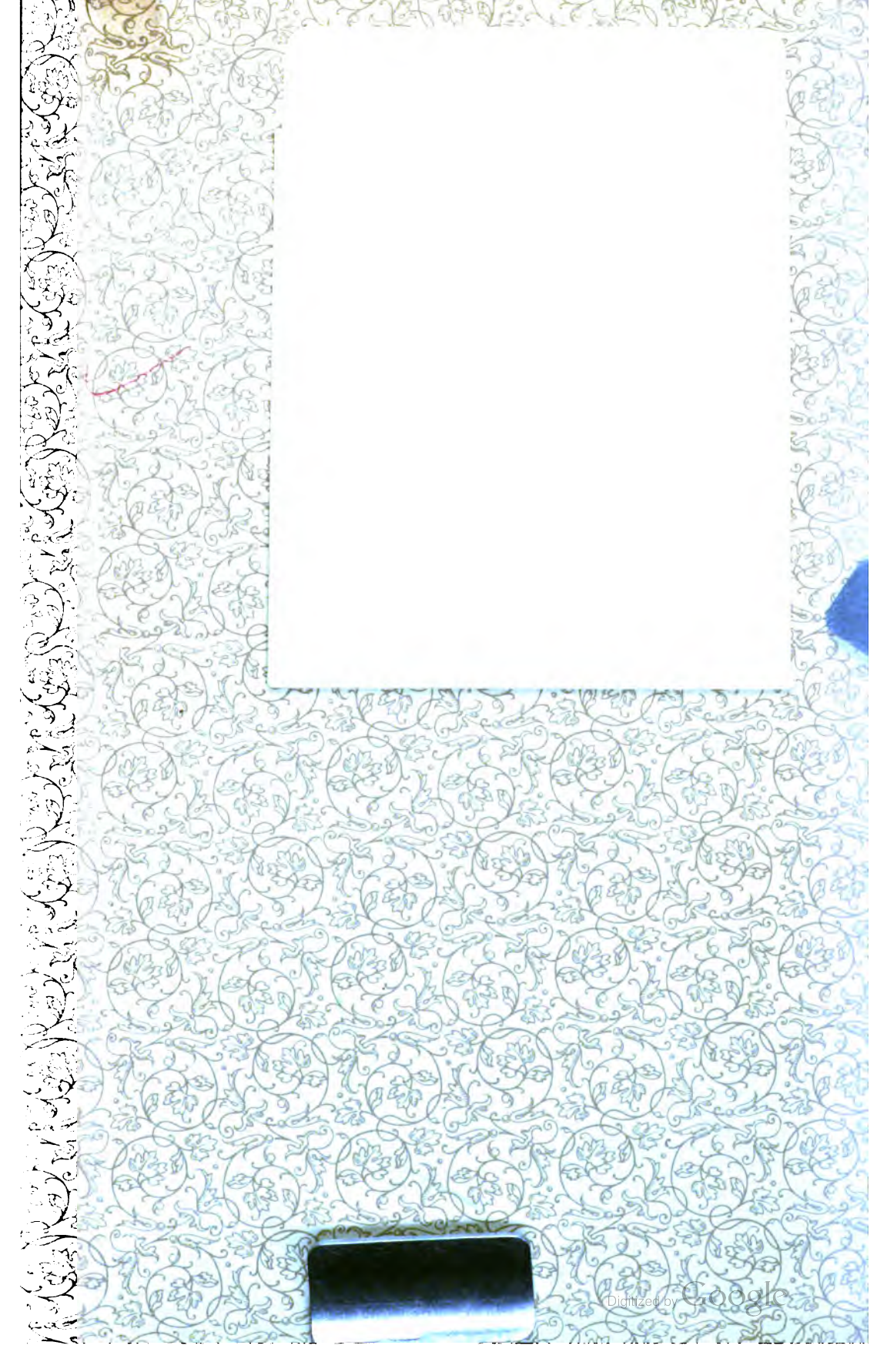
Periodenzahl	Maximale Induktion auf der Cylinderoberfläche	im Centrum	im Mittel
50	$1\,000 = B_0$	$0{,}95 \times B_0$	$0{,}93 \times B_0$
50	$5\,000 = B_0$	$0{,}84 \times B_0$	$0{,}80 \times B_0$
50	$10\,000 = B_0$	$0{,}88 \times B_0$	$0{,}81 \times B_0$
50	$15\,000 = B_0$	$0{,}96 \times B_0$	$8{,}89 \times B_0$
150	$1\,000 = B_0$	$0{,}86 \times B_0$	$0{,}80 \times B_0$
150	$5\,000 = B_0$	$0{,}54 \times B_0$	$0{,}65 \times B_0$
150	$10\,000 = B_0$	$0{,}72 \times B_0$	$0{,}67 \times B_0$
150	$15\,000 = B_0$	$0{,}92 \times B_0$	$0{,}76 \times B_0$
600	$1\,000 = B_0$	$0{,}50 \times B_0$	$0{,}65 \times B_0$
600	$5\,000 = B_0$	$0{,}10 \times B_0$	$0{,}53 \times B_0$
600	$13\,000 = B_0$	$0{,}10 \times B_0$	$0{,}58 \times B_0$
600	$18\,000 = B_0$	$0{,}70 \times B_0$	$0{,}79 \times B_0$

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

8908968368 4
B890896836 84A


Digitized by Google

b89089683684a